COLLECTION DES INITIATIONS SCIENTIFIQUES

Fondée par C.-A. LAISANT, examinateur d'admission à l'École Polytechnique.

CH.-ÉD. GUILLAUME

Correspondant de l'Institut de France

Directeur du Bureau international des Poids et Mesures

Initiation à la Mécanique

OUVRAGE ÉTRANGER A TOUT PROGRAMME

DÉDIÉ AUX AMIS DE L'ENFANCE

Avec 50 figures dans le texte

SEPTIÈME ÉDITION REVUE

(17e mille.)

LIBRAIRIE HACHETTE

79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1921

Initiation à la Mécanique

« Montrez en peu de mots les grands objets d'une science, marquez-en les résultats par quelques exemples frappants........ Ne vous flattez pas d'enseigner un grand nombre de choses. Excitez seulement la curiosité. Contents d'ouvrir les esprits, ne les surchargez point. Mettez-y l'étincelle. D'eux-mêmes ils s'éprendront par l'endroit où ils sont inflammables ».

(Anatole France, *Le Jardin d'Épicure*.)

1239-20. — Coulommiers. Imp. PAUL BRODARD. — 2-21.

COLLECTION DES INITIATIONS SCIENTIFIQUES

Fondée par C.-A. LAISANT, examinateur d'admission à l'École Polytechnique.

CH.-ÉD. GUILLAUME

Correspondant de l'Institut de France

Directeur du Bureau international des Poids et Mesures

Initiation à la Mécanique

OUVRAGE ÉTRANGER A TOUT PROGRAMME

DÉDIÉ AUX AMIS DE L'ENFANCE

Avec 50 figures dans le texte

SEPTIÈME ÉDITION REVUE

(17e mille.)

LIBRAIRIE HACHETTE

79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1921

AVERTISSEMENT

Dans l' « avant-propos » de l'*Initiation mathématique*, j'avais écrit : « Je souhaite que de pareilles tentatives puissent être faites pour les sciences physiques et pour les sciences naturelles ».

Ce vœu reçoit satisfaction par la publication des *Initiations*, collection dont fait partie le présent volume. Il est destiné, entre les mains de l'éducateur, à servir de guide pour la formation de l'esprit des tout jeunes enfants — de quatre à douze ans — afin de meubler leur intelligence de notions saines et justes, et de les préparer à l'étude, qui viendra plus tard.

Ce but peut et doit être atteint en intéressant et amusant l'enfant, *sans aucun appel direct à sa mémoire*, en piquant et excitant sans cesse sa curiosité, en l'amenant de lui-même à la vérité; considérer ce petit livre comme un manuel à faire apprendre serait une faute capitale; il faut s'en inspirer, non pas le suivre servilement.

Il faut aussi ne jamais cesser d'observer avec une affectueuse et scrupuleuse attention le petit cerveau que nous avons pour mission de développer; sachons tirer parti de ses qualités merveilleuses, sans exiger de lui ce qu'il ne peut donner, en le ménageant avec un soin extrême, en évitant la fatigue et l'ennui, ces poisons de l'enseignement.

Mes collaborateurs et moi, nous pouvons répéter encore : « C'est à un sauvetage de l'enfance que nous convions parents — mères de famille surtout — et éducateurs ».

Cet appel, nous l'adressons avec confiance; mille preuves abondent, montrant que de toutes parts on commence à constater les lacunes, les imperfections du premier enseignement, et à comprendre la nécessité d'une transformation profonde.

Et nulle tâche n'est plus haute; car l'enfance est l'humanité de demain.

C.-A. L.

PRÉFACE DE L'AUTEUR

Le titre de cet ouvrage pourrait induire en une erreur que je voudrais tout d'abord dissiper. Il n'a pas, comme on pourrait le penser, la prétention d'initier à la connaissance des machines ou des *mécaniques*, ainsi qu'on les désignait autrefois, et c'est à peine si, de loin en loin, on y donnera la description sommaire d'une machine usuelle.

Mais le plan de la science mécanique est plus vaste : elle s'occupe de tout ce qui concerne les forces, de tout ce qui a trait au mouvement. Une pierre tombe, un enfant marche, un fétu de paille ploie ou se redresse au gré du vent en vertu des actions que la mécanique étudie; et nous comprendrions bien peu de chose à ces phénomènes si fréquents et si naturels, si nous n'avions, par l'étude ou par une observation attentive, acquis quelques idées nettes sur les actions des forces et les lois du mouvement.

Autour de nous tout se meut, partout des forces agissent; et cette universalité des phénomènes mécaniques serait déjà une raison suffisante pour que les enfants en eussent la précoce initiation. Mais il y a plus : la mécanique envisage les phénomènes sous une forme simple; elle ne cherche pas, comme la physique, à savoir ce que deviennent les corps lorsqu'on les chauffe ou les refroidit, ou lorsqu'un courant électrique les parcourt; elle ne se soucie point, comme la chimie, d'établir l'intimité d'une substance et de deviner les matières élémentaires dont elle est composée; elle sait, en revanche, que la matière résiste à la force, tout en lui cédant; que les corps tombent vers la terre lorsqu'ils sont libres de le faire, et qu'ils pressent sur les supports qui les en empêchent; et tous ces phénomènes, avec beaucoup d'autres d'un égal degré de simplicité, elle sait les décrire minutieusement. Elle s'occupe aussi un peu de ce qui se passe lorsque deux corps se rencontrent, et veut savoir s'ils sont durs et se repoussent, ou s'ils sont mous, et s'écrasent l'un contre l'autre; encore l'examen détaillé de semblables phénomènes est-il déjà du ressort de la physique, à laquelle la mécanique les abandonne pour les lui clarifier d'abord, par-dessus la limite un peu vague qui sépare leurs domaines respectifs.

Ainsi délimité, le programme qu'embrasse la mécanique paraît donc particulièrement dépourvu de complication; et, par une tendance naturelle aux intelligences précises, c'est à son étude que les chercheurs se sont d'abord attachés. Ses lois sont apparues les premières à leur esprit fasciné, et elles sont demeurées pour nous les plus faciles à saisir.

Pour cette même raison, la mécanique a été, pour l'humanité pensante, une puissante éducatrice. Alors que l'on voyait encore, dans la multitude des phénomènes complexes qui nous entourent, — phénomènes météorologiques et biologiques notamment,— l'action incessante d'esprits bons ou mauvais, mais toujours puissants et subtils, détournant à leur gré le cours naturel des choses, la mécanique, avec l'astronomie sa sœur jumelle, a montré que, au moins dans un domaine restreint, les événements sont soumis à des lois, c'est-à-dire à des relations constantes de cause à effet. Or la croyance à l'existence des lois a été le début de la pensée scientifique, comme elle est encore le fondement de toute science; M. H. Poincaré l'a superbement exposé dans un livre que tout le monde a lu [1].

Cette vertu éducatrice, la mécanique l'a conservée pour l'enfant, dont l'évolution, puissamment aidée par l'expérience des aînés, préparée aussi par l'hérédité, est une vue en raccourci du développement de la pensée humaine.

Convier l'enfant à la découverte des lois que la mécanique rassemble, y procéder avec lui, c'est lui enseigner la méthode scientifique et lui donner la foi dans la mission élevée de la science; c'est aussi l'amener à penser avec précision, car la simplicité des principes de la mécanique entraîne leur rigoureuse exactitude, dans la forme qui les énonce. Lorsque l'enfant aura compris ces principes — et, il faut pour cela qu'ils aient pénétré en lui par la voie de l'expérience, — il sera excellemment préparé à aborder toutes les autres études, faisant appel à une pensée plus complexe et plus mûre.

1. *La Valeur de la Science.*

*
* *

La simplicité et la rigueur des relations entre les grandeurs élémentaires de la mécanique a permis d'en pousser très loin l'étude en utilisant toutes les ressources de l'appareil mathématique. En s'emparant des lois de la mécanique et en cherchant toutes leurs conséquences, à la fois grandioses et précises, les géomètres ont étendu immensément son domaine, et nul ne contestera que ce soit un grand bienfait. D'autre part, les mathématiciens ont été chargés souvent de son enseignement; et, si l'on ne peut que s'en féliciter quand on pense aux Écoles supérieures, on est conduit à faire quelques réserves lorsqu'on songe à la première initiation. L'esprit du mathématicien est trop souvent préoccupé du seul développement logique des vérités évidentes pour donner, dans un enseignement élémentaire d'une science de la nature, toute l'importance désirable à la découverte de vérités qui ne sont ni évidentes, ni nécessaires.

C'est là un danger auquel la conception de la mécanique n'a pas toujours échappé, ni dans la pensée des maîtres, ni surtout dans celle des élèves.

Depuis quelques années cependant, de très bons esprits réagissent. Dans un livre devenu rapidement célèbre, M. Ernst Mach a rappelé le développement historique de la mécanique, et ramené ainsi son enseignement vers celui des sciences plus purement expérimentales. Plusieurs des conducteurs de la pensée mathématique ont joint leur voix à celle de l'éminent professeur de Vienne, et ont étendu, en la rendant plus bienfaisante encore, l'action de son livre. Plus tard, nos jeunes amis le liront; et, si l'Initiation que j'ai tentée leur en donne le vif désir, mon modeste travail aura porté ses meilleurs fruits.

*
* *

Il est entendu que le plan de chacun des volumes de cette *Initiation*, que dirige M. Laisant, est étranger à tout programme d'examens. Peut-être, en voyant celui que j'ai adopté, pensera-t-on que j'ai cherché avec soin à réaliser le contre-pied de tous les programmes. Une telle préoccupation serait évidemment puérile. Ne pas se plier volontiers à une discipline que l'on trouve par endroits trop rigide ne signifie pas qu'on soit résolu à la braver toujours; on peut chérir la liberté sans être un anarchiste militant, et il serait singulièrement présomptueux de rejeter l'ordre établi, pour la seule raison que d'autres s'y sont soumis. Je voudrais échapper à une semblable accusation, et, dans ce but, justifier le plan auquel je me suis arrêté, parce qu'il m'est apparu le meilleur pour une initiation.

En mécanique, on débute presque toujours par la statique, puis on passe à la dynamique, d'une structure en apparence plus complexe. Mais que l'on y regarde de près avec les yeux du physicien : pourquoi la plupart des corps qui nous entourent sont-ils dans un état de repos relatif? Uniquement parce que, aux forces qui tendraient à les déplacer, la Nature oppose des forces antagonistes, automatiquement développées. L'origine de ces forces se trouve dans les réactions élastiques des corps et dans le frottement des surfaces.

Si ces forces nous sont inconnues au moment où nous abordons l'étude de la statique, celle-ci est une science artificielle ou une simple abstraction. Or les actions automatiques qui rendent la statique possible sont d'une nature complexe, et leur étude ne peut être abordée que lorsqu'on connaît les effets plus simples que les forces peuvent engendrer.

La notion métrologique de la masse est aussi beaucoup plus simple que celle de la force; on n'en cherchera guère d'autre preuve que le fait d'avoir, dans toutes les législations, défini l'unité de quantité de matière avant celle de la force et des grandeurs qui en dérivent. J'ai trop combattu moi-même en faveur de cette idée pour chercher à l'affaiblir en quoi que ce soit.

Mais ne l'oublions pas : nous ne nous adressons pas à des hommes, dont l'esprit est en pleine possession de la connaissance et de la logique; nous ne faisons ni de la législation, ni de la métrologie; nous travaillons pour les enfants, auxquels nous voudrions seulement ouvrir une fenêtre sur la nature, en leur disant : « Regardez et apprenez ».

L'enfant a le sens de la force, que lui donne l'exercice de ses muscles; en lui parlant de forces, on fait donc appel à une notion qui n'a rien de mystérieux pour lui qui ne cherche pas encore les subtilités, et sur laquelle on peut greffer d'autres notions plus cachées. La masse en est une, parce que l'enfant ne distingue pas, avant qu'on ait attiré son attention sur leur divergence fondamentale, les effets des forces employées à soulever une pierre ou à la mettre en mouvement par une poussée qui lui permette de franchir seule un espace étendu; en d'autres termes, il distingue mal entre le poids et la masse; on ne saurait, à vrai dire, lui reprocher son défaut de perspicacité, car beaucoup d'hommes d'une science déjà mûre ne sont pas beaucoup plus avancés.

Pour nous, la notion de masse deviendra claire lorsque nous aurons élucidé celle du travail; la masse apparaîtra alors, avec nécessité : ce qui est capable d'emmagasiner du travail ou de le restituer; et cette propriété fondamentale de la masse nous sera bientôt si familière que nous serons tout prêts alors à la définir par un vocable approprié à sa nature, et dont l'aspect seul nous effraierait encore un peu.

Ces premières notions étant acquises, le moment sera venu de parler des forces antagonistes qui donnent à la nature sa stabilité; lorsque nous les connaîtrons, la composition des forces, le centre de gravité, les couples, seront pour nous d'une étude très facile.

Mais la dynamique reparaîtra; car les forces produisent des accélérations, réelles ou empêchées, qui se combinent entre elles pour produire des effets inattendus. Et nous verrons enfin, par leur action simultanée, apparaître les bizarres illusions de la verticale, si fertiles en enseignements profonds.

En parcourant la Table des Matières, un professeur critiquera probablement son désordre apparent; mais je crois que, s'il prend la peine de recourir au texte, il jugera avec plus de bienveillance l'ordre adopté. J'y ai été conduit tout naturellement, comme à l'un de ceux qui ne présentent nulle part une fissure; d'un chapitre à l'autre, la continuité m'a paru être aussi complète que possible, et particulièrement propre à guider à chaque instant l'esprit vers ce qu'il désirait savoir. Seuls les derniers chapitres constituent un hors-d'œuvre, non absolument nécessaire, mais que j'estime fort utile; partis de l'étude des phénomènes naturels isolés, nous y revenons, en les associant en des ensembles plus complets, tels que nous les offre la nature ou l'industrie des hommes; et, si les parents et les maîtres nous ont suivi jusque-là, ils auront, j'ose l'espérer, puisé dans cette étude de la mécanique le sujet d'intéressantes observations auxquelles ils convieront avec plaisir leurs enfants, leurs élèves ou leurs jeunes amis.

CH-ÉD. GUILLAUME.

Pavillon de Breteuil, Sèvres, mai 1909.

INITIATION
A LA MÉCANIQUE

PREMIÈRE PARTIE

PRÉPARATION A L'ÉTUDE DE LA MÉCANIQUE

CHAPITRE I

COMMENT ON ÉTUDIE LA NATURE

1. — Observation et expérimentation.

Si nous voulons faire quelques progrès dans notre étude de la nature, nous devons, avant tout, aimer à contempler ses aspects sans cesse renouvelés, les laisser pénétrer en notre esprit et le tenir sous le charme; puis nous devons y penser souvent, les comparer entre eux, apprendre à discerner ce qu'ils ont de semblable, afin de deviner, par les mêmes effets, l'existence des mêmes causes. Classer ces effets, rechercher ces causes, ce sera le premier pas vers la découverte de leurs relations, c'est-à-dire des lois naturelles.

Regardons une pierre qui roule au flanc d'une montagne. Elle tourne d'abord lentement sur elle-même, puis accélère peu à peu sa marche; elle rencontre une racine, fait un bond, retombe, roule et rebondit encore, jusqu'au moment où, arrivée au fond du vallon, elle fait un dernier saut, roule mollement et s'arrête.

Voyons successivement dix pierres, cent pierres rouler; nous reconnaîtrons, dans leur marche, un point de ressemblance : elles vont de plus en plus vite. Mais là s'arrête la similitude; elles suivront toutes des chemins différents, parce que chacune d'elles sera soumise à des actions particulières qu'ignoreront les autres.

Si nous étions doués d'une perspicacité cent fois supérieure à celle de Sherlock Holmes, nous débrouillerions peut-être, à force de persévérance, l'écheveau compliqué des actions auxquelles chaque pierre obéit. Mais il faut nous prendre tels que nous sommes : des êtres aux sens obtus et lents à comprendre; il faut faciliter notre tâche en aidant la nature à nous livrer ses secrets.

Pour y parvenir, nous en organiserons un petit coin dans lequel les phénomènes se passeront de façon particulièrement simple : nous remplacerons l'*observation* directe par une opération voisine, qui est l'*expérimentation*.

Une *expérience* est une question posée à la nature, toujours prête à répondre correctement si la question est correctement posée. Pas de faux témoins qui nous entraînent sur de mauvaises pistes, pas d'avocats cherchant à égarer l'instruction. La nature se présente à nous dans toute sa sincérité, et tout notre art devra consister à lui poser une question simple, à laquelle elle ne puisse donner qu'une réponse simple elle-même.

Remplaçons le flanc de la montagne par une planche bien rabotée, la pierre par une boule qu'aura faite un habile tourneur, et laissons la boule rouler le long de la planche, que nous aurons inclinée. Après notre expérience, nous pourrons décrire à très peu près non seulement le chemin que suivront toutes les boules bien faites roulant sur des planches rabotées de même inclinaison, mais encore les autres particularités de leur descente; nous saurons quelle doit être la durée du trajet, et même, si notre observation a été complète, les instants où la boule passera en chaque point de la planche.

2. — Approximation et simplification.

Mais pourrons-nous décrire *rigoureusement* toutes les circonstances accompagnant la descente de la boule? Non, parce que notre planche n'est pas parfaitement droite, ni notre boule parfaitement ronde; dans une autre expérience, une planche sera autrement droite et la boule autrement ronde. Cependant, la planche est beaucoup plus droite et la boule beaucoup plus ronde que ne sont le flanc de la montagne et la pierre que nous y faisons rouler. Nous n'avons pas réalisé la simplicité complète, mais nous nous en sommes beaucoup approchés; ce qui reste de complication est peu de chose par rapport à tout ce que nous en avons déjà supprimé.

Entrons dans le détail. Un bon procédé pour déterminer le chemin que suit la boule consistera à noircir la planche avec du noir de fumée, dans lequel la boule laissera la trace de son passage. Examinons cette trace; à première vue, nous dirons : c'est une ligne droite; et nous ne serons pas loin de la vérité; mais, si nous tendons un fil très fin entre les extrémités de la ligne, nous y reconnaîtrons l'existence de petites ondulations.

Nous nous poserons alors cette question : à quoi sont dues ces déviations de la ligne droite? Si nous avons opéré en plein Paris, où les autobus secouent les maisons et font dégringoler les plâtres, nous ne chercherons pas longtemps : nous en rendrons responsables ces terreurs de la rue. Mais, pour peu que le doute nous tourmente, nous attendrons que tout soit tranquille, et nous recommencerons. Les ondulations de notre ligne seront beaucoup diminuées, ce qui nous confirmera dans notre hypothèse; mais il en demeurera quelque trace, et nous en conclurons que cette hypothèse est insuffisante; nous penserons alors que notre planche n'est pas assez plane ou notre boule assez ronde pour que le chemin de celle-ci soit une droite parfaite, c'est-à-dire la simplicité même.

A pousser cette expérience jusque dans le détail, nous avons gagné plusieurs notions qui nous seront utiles : nous avons vu qu'un examen minutieux de ce qui se passe nous fait découvrir des particularités qui nous avaient d'abord échappé; puis que, même quand nous cherchons à réaliser la simplicité, nous n'y parvenons pas complètement.

Mais nous ne nous embarrasserons pas trop de ces petites complications. Nous dirons : nous avons voulu réaliser des conditions simples, et nous y avons réussi à peu près, notre résultat était approximativement simple; il l'aurait été tout à fait si notre expérience avait été préparée à la perfection.

Ce que nous venons de faire, c'est ce que font tous les hommes de science; ils travaillent du mieux qu'ils peuvent, et, pour le reste, ils interprètent le résultat en le dépouillant des petites complications qui l'encombrent encore.

Une expérience bien faite ne consistera donc pas à tenter l'impossible, qui est la perfection; elle s'en approchera le plus qu'elle pourra; elle rendra prépondérante une seule action, de manière à ce que les autres disparaissent à peu près, et le raisonnement qui suivra les rejettera complètement.

Les particularités abandonnées dans une première recherche peuvent souvent être reprises; ainsi, dans la descente d'une boule, l'étude des oscillations peut présenter un grand intérêt. Celles-ci nous révèlent les mouvements de notre maison, secouée par les trépidations de la rue. Si ces mouvements du sol n'ont pas, comme le plus souvent dans les villes, une cause artificielle, mais bien une origine naturelle, on les nomme des *séismes*, et leur étude est d'une importance extrême; mais c'est là un autre problème, que l'on abordera par d'autres procédés.

Et il en est partout ainsi; les premiers naturalistes ont décrit les grands animaux dans leurs formes générales, puis d'autres se sont occupés de leur anatomie; ensuite sont venus des histologistes, qui ont exploré leurs tissus au microscope; enfin, l'étude des microbes auxquels ils donnent l'hospitalité est venue concentrer sur ces infiniment petits la plus grande somme d'intérêt. Ce sont une série de problèmes distincts, dont l'importance apparaît successivement. On débrouille d'abord, en simplifiant et en ne gardant que les grosses choses, puis on entre peu à peu dans le détail en reprenant ce qu'on avait d'abord négligé.

3. — Besoin de simplicité.

Que ce soit en raison de sa paresse naturelle ou de son besoin de clarté, notre esprit aime ce qu'il voit nettement, sans trop de peine, et c'est pour cela qu'il simplifie constamment. Lorsque nous disons que le nombre des habitants de la France est de trente-neuf millions, nous exprimons sciemment un fait erroné. La vérité est que nous n'avons pas gardé en notre mémoire le nombre des habitants de la France. En disant 38 893 654, nous serions peut-être plus près de la vérité, mais nous n'en savons rien ; et, entre un nombre compliqué dont nous ne sommes pas sûrs ou dont la rigoureuse exactitude importe peu, et un nombre simple que nous ne pouvons pas garantir davantage, et qui est sûrement assez approché pour l'usage que nous en voulons faire, nous choisissons toujours ce dernier.

Le besoin de simplicité dirige des opérations de toutes natures. Sait-on, par exemple, pourquoi le canon de 305 millimètres est devenu normal dans la marine? Tout simplement parce que son calibre intérieur est de 12 pouces anglais (exactement 304 mm, 8). Il peut y avoir des raisons techniques pour préférer un canon de 12 pouces à un canon de 11 ou de 13. Mais 304 ou 306 sont trop voisins de 305 pour que l'on eût pu trouver un inconvénient quelconque à s'arrêter à l'une ou l'autre de ces dimensions, au lieu de celle que l'on a choisie. Les Anglais, ayant reconnu qu'un canon de 1 pied environ d'ouverture remplissait une série de conditions avantageuses, ont adopté ce diamètre exact par besoin de simplicité; et, dans les autres pays, on a suivi parce que l'Amirauté anglaise est généralement bien inspirée dans ce qu'elle fait.

4. — Les limites de l'expérimentation.

Plus notre mode d'investigation est grossier, plus le résultat semble parfait; la ligne tracée par la boule sur la planche nous paraissait droite aussi longtemps que nous ne l'avions pas comparée à un fil tendu, et c'est seulement lorsque nous avons procédé à cette opération, que les sinuosités sont apparues.

De même, un terrassier tâte, de ses doigts épais, une glace puis une planche rabotée; il les trouve également unies. Un aveugle, dont le sens tactile est particulièrement affiné, pourrait ranger, entre la planche et la glace, dix surfaces de rugosité décroissante.

Une dentelière, de son côté, distinguera, de ses doigts délicats, la grosseur de toute une série de fils, dont un forgeron ignorerait l'existence s'il n'avait, pour la connaître, d'autre moyen que de les prendre isolément entre le pouce et l'index.

Ces jugements que nous portons sur les objets ne dépendent pas seulement de l'affinement de nos sens; ils varient avec les moyens empruntés à la nature pour les examiner.

L'écho est l'image d'un son, comme notre portrait dans une glace est l'écho de notre visage. Mais, pour percevoir une bonne image, il faut qu'elle se forme par réflexion sur une surface dont toutes les rugosités palpables, et même de bien plus petites, aient été enlevées. L'écho, au contraire, se forme sur une voile tendue, sur un mur, sur un rideau d'arbres, peu distinctement sur ce dernier, mais encore nettement sur une maison. Celle-ci est donc, pour le son, un miroir très suffisant, qui en renvoie l'image sans déformation appréciable.

Pourquoi cette différence? La structure de la lumière est beaucoup plus fine que celle du son; celui-ci, comme le terrassier pour la planche, a déclaré que le mur est parfaitement lisse, alors que la lumière a pu en reconnaître toutes les proéminences et les scruter, comme la dentelière isole des fils et les classe.

Et cette différence dans le mode d'action de la lumière et du son se retrouve dans toutes leurs manifestations; elle nous permet d'entendre les paroles d'une personne dont un mur nous sépare, alors que, pour la voir, il faut que nous puissions la regarder directement.

Dans l'étude de la nature, nous devrons être absolument conscients de la délicatesse de nos procédés d'investigation. Quelquefois il les faut subtils, d'autres fois nous les préférerons moins perspicaces. Regardons à la loupe une jolie gravure; nous distinguerons isolément tous les points, plus ou moins gros, plus ou moins séparés de blancs, qui en constituent les ombres plus ou moins noires; mais son dessin, bien que moins agréable à regarder, n'aura pas encore complètement disparu. Examinons-la maintenant au microscope; les points subsisteront seuls, et nous ne saurons même pas les relier. Comme les arbres empêchent de voir la forêt, les points empêchent de voir la gravure. Trop de perspicacité exagère le détail et laisse ignorer les ensembles.

La grossièreté d'un procédé d'examen produit elle-même la simplification que notre esprit serait, sans cela, obligé d'effectuer. Le premier coup d'œil jeté sur notre planche avait laissé apparaître une ligne droite, qui s'est trouvée dénaturée lorsque nous l'avons trop bien regardée; ses sinuosités sont, nous l'avons vu, intéressantes à un point de vüe particulier; mais, pour notre première étude de la question, elles constituent déjà un détail trop subtil.

5. — L'illusion.

Nos sens ne sont pas seulement trop grossiers ou trop perspicaces; ils peuvent, en outre, ignorer la vraie nature de ce qu'ils perçoivent, et ils nous font alors un faux rapport. Certes, ils ne sont pas menteurs, et cependant ils nous mentent constamment, parce qu'eux-mêmes se laissent tromper. Ils sont comme des juges d'instruction qui ne sauraient pas démêler, dans les aveux d'un inculpé, ce qui est vrai de ce qu'il y mélange pour améliorer son cas.

Nos yeux nous diront que le dessin ci-dessous (fig. 1) représente une spirale. Mais suivons cette spirale avec la pointe d'un crayon, nous la verrons se résoudre en une

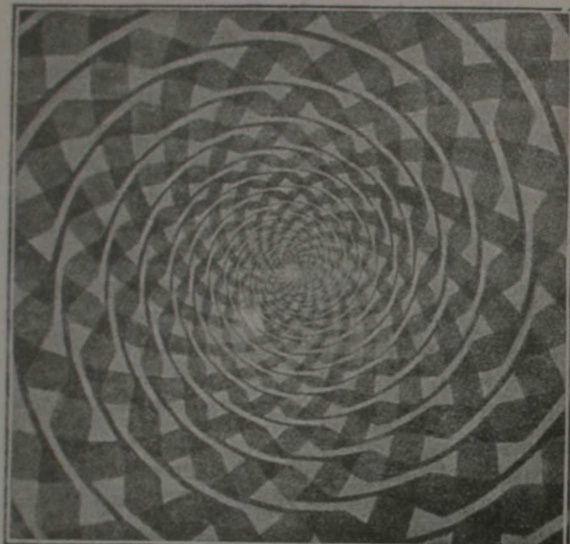


Fig. 1. — Spirale ou circonférence? Cherchons.

circonférence. L'inventeur de cette illusion, M. Fraser, avait voulu tromper notre vue, et il y a complètement réussi; celle-ci nous a trompés à son tour, mais sans le vouloir.

Les illusions sont de tous les domaines. Lorsque, au XVI^e siècle, le thermomètre permit de reconnaître la température autrement qu'en touchant les corps avec la main, on fut très étonné de constater que les sources sont plus froides en hiver qu'en été, alors que le témoignage des sens avait toujours enseigné le contraire. C'était une illusion dont nous reconnaîtrons la cause en plongeant notre main droite dans de l'eau froide, la gauche dans de l'eau chaude, puis toutes deux dans de l'eau tempérée, que la gauche déclarera froide et la droite chaude.

A poids égal, un corps nous semble d'autant plus lourd qu'il est plus petit. L'expérience réussit à coup sûr. Mettons, dans les mains d'un ami, une boîte de carton et une balle de plomb que nous aurons reconnues de même poids, et posons-lui la question suivante : Combien la balle pèse-t-elle de fois plus que la boîte? La réponse la plus ordinaire sera : Trois ou quatre fois. Ne nous fions donc pas au témoignagne de notre main, lorsque, si cela nous arrive jamais nous achèterons un poulet ou une langouste.

La distraction nous laisse ignorer la fuite du temps; mais, lorsqu'une journée a été très chargée d'événements, bien qu'elle nous ait paru courte, arrivés au soir le matin nous en semble déjà fort éloigné. En voyage, nous confondons souvent hier et avant-hier.

L'attente rend le temps interminable; l'expression populaire « Je me suis fait vieux à vous attendre » en est un indice pittoresque.

La perte de nos illusions nous cause des regrets, et, dans la pratique ordinaire de la vie, nous sommes plus heureux d'en conserver quelques-unes. Les peintres, les graveurs, tous ceux qui, pour le plaisir de nos yeux réalisent une image de la nature, font appel à notre facilité d'illusion; et mieux ils y réussissent, plus nous leur en sommes reconnaissants.

Mais lorsqu'au lieu de sentir nous voulons connaître, il faut nous défaire de nos illusions, et chercher à voir les choses telles qu'elles sont, dans les limites de puissance et de perspicacité de nos sens.

Talleyrand recommandait de se défier de son premier mouvement, « parce qu'il est le bon »; nous apprendrons à nous méfier de notre première impression, mais pour la raison inverse : « parce qu'elle est souvent mauvaise ».

6. — L'éducation des sens, la mesure.

Nous avons un premier moyen de nous protéger contre les erreurs dans les rapports que nous font nos organes des sens, c'est de faire leur éducation. Certaines personnes ont de bons yeux, d'autres les ont médiocres; mais l'éducation de notre œil peut autant, pour la perfection de ses jugements, que l'éducation des doigts pour la perfection du jeu du pianiste ou du travail de l'orfèvre.

Il y a des mains qui cisèlent, alors que d'autres ne sauraient que forger; de même, l'œil exercé d'un bon observateur voit d'infimes détails qui échappent à l'homme moyen. L'œil du peintre ou celui du teinturier (car la profession comme l'art affine les sens) distingue dix nuances où un œil ordinaire ne reconnaît qu'une teinte. L'oreille du musicien perçoit, dans le jeu d'un orchestre, chaque son de la flûte, chaque trait du violon, alors que l'auditeur non professionnel ne saisit qu'une impression d'ensemble.

L'école moderne fait bon marché de l'éducation des sens. Meubler l'esprit de la science des autres semble être l'unique souci de beaucoup d'éducateurs, qui mériteraient plutôt le nom générique de déformateurs. Leurs élèves apprennent à *voir par procuration*, alors que, dans toutes les circonstances de la vie et dans tous les actes d'une profession, ils devront voir avec leurs propres yeux.

S'efforcer de distinguer tout ce que l'œil permet de voir, l'oreille d'entendre, la pointe des doigts de discerner, tel doit être le souci constant de l'enfant qui veut être à même de bien connaître les objets au milieu desquels s'écoulera sa vie. D'aucuns éduqueront, dans un but spécial et souvent professionnel, leur goût ou leur odorat; et, si nous avons affiné toutes les sources de nos perceptions, la connaissance pénétrera en nous par des portes largement ouvertes.

L'établissement des connexions entre les organes des sens n'est pas moins important, et il en est, parmi elles, d'étonnamment précises. Alors qu'un joueur de boules appréciera difficilement à un mètre près la distance du cochonnet, il le piquera presque à coup sûr; son habileté témoigne d'une coordination parfaite entre son estimation visuelle et son sens musculaire, coordination en partie inconsciente, que l'éducation a réalisée, et qu'utilise un mécanisme automatique.

Par une coordination poussée très loin, la vie moderne a créé des hommes nouveaux. Combien, par la rapidité de ses perceptions, le chauffeur d'automobile est supérieur au paysan conduisant sa charrette au petit trot d'un cheval bien sage! Le chauffeur perçoit tout un ensemble d'objets qui peuvent devenir, un dixième de seconde plus tard, des obstacles redoutables; aussitôt il distribue à ses membres tous les ordres qu'il faut exécuter s'il ne veut pas courir à une catastrophe.

L'aviateur est aujourd'hui cette merveille d'éducation composant à lui seul tout un orchestre de sensations et de commandements. Car, si l'homme a appris à voler dans les airs, ce n'est pas seulement parce qu'il a su construire des machines volantes; c'est tout autant parce qu'il a pris conscience de tous leurs mouvements dans le fluide décevant où elles évoluent. L'éducation des sens a créé cet homme nouveau, l'un des aspects du surhomme, réalisant l'idéal de plusieurs millénaires d'humaine espérance.

Le second moyen de nous protéger contre nos illusions consiste à substituer à la simple observation une opération plus minutieuse, qui s'appelle la *mesure*.

Celle-ci n'est pas nécessairement une opération scientifique; tout le monde mesure plus ou moins, mais les mesures scientifiques sont en général plus précises que les mesures de la vie courante.

La perfection de la mesure a suivi, et souvent précédé le progrès de la science, dont elle a été maintes fois la condition. Mais des mesures grossières ont conduit à des découvertes intéressantes ou même grandioses. Plus tard, la mécanique nous enseignera les lois de l'oscillation du pendule, et nous en donnera les raisons profondes. Galilée sut les découvrir simplement en tâtant son pouls, tandis qu'il voyait un grand lustre se balancer majestueusement dans la nef de la cathédrale de Pise. Sa dévotion était médiocre, à ce qu'il semble; on le lui fit bien voir à une autre occasion.

Plus tard, Galilée eut besoin de mesurer avec plus de certitude le temps qu'employait un corps pour rouler le long d'un plan incliné. Pour y parvenir, il disposait, au-dessus d'une balance, un vase rempli d'eau et muni d'un petit orifice inférieur débouchant dans un verre que portait la balance. Galilée tenait le doigt sur l'orifice, et le découvrait brusquement lorsque le corps était abandonné à lui-même, puis le refermait lorsque sa descente était terminée. Il pesait alors l'eau contenue dans le verre, et calculait le temps qu'il voulait connaître.

Ces mesures de Galilée étaient encore peu précises; mais il fallait bien commencer par quelque chose et faire ce qu'on pourrait appeler du *défrichage*. Sa découverte des premières lois de la mécanique, et en particulier de celles qui régissent les mouvements du pendule, eurent précisément pour effet de permettre la mesure plus exacte du temps. Un siècle plus tard, Huyghens appliquait le pendule à la régulation du mouvement des horloges; puis, plus tard encore, il adapta aux montres un principe analogue, en ramenant toutefois un balancier vers sa position d'équilibre au moyen d'un ressort, au lieu de la pesanteur qui agit sur le pendule. On donna ultérieurement à ce ressort la forme d'une spirale, d'où le nom de *spiral* par lequel on le désigne.

La mesure du temps est allée sans cesse en se perfectionnant. Voici par exemple ce que nous enseignent, à cent vingt ans de distance, les concours de l'Observatoire de Genève : En 1790, un prix de 20 louis fut offert pour la meilleure montre, à la condition que l'erreur de ses marches n'excédât pas une minute par jour au repos et deux au porté. Aucune montre ne sut, la première année, satisfaire à cette condition, à laquelle trois montres atteignaient déjà l'année suivante.

Aujourd'hui, c'est à moins de deux dixièmes de seconde que les marches diurnes successives des très bonnes montres sont égales; et nous ne donnerions pas dix francs de celles qui remportaient des premiers prix à la fin du XVIIIe siècle.

L'étude de certains phénomènes délicats de la mécanique oblige souvent à mesurer un temps extrêmement court.

Nous indiquerons plus tard un procédé utilisé pour déterminer la durée infime d'un choc. Mais voici le moyen que l'on emploie très couramment pour mesurer des intervalles de temps de peu de durée.

Lorsqu'on frappe un diapason, ses branches se rapprochent et s'éloignent alternativement, de telle sorte que les va-et-vient successifs ont exactement la même durée. Nous pouvons fixer, à l'une des branches, une pointe très fine, grattant le noir de fumée déposé sur un papier enroulé sur un tambour que l'on fait tourner d'un mouvement rapide. La pointe tracera dans le papier une ligne régulièrement sinueuse, et, si le diapason effectue 500 va-et-vient en une seconde, nous saurons que chacune des ondulations correspond à la 500e partie d'une seconde. En marquant par une étincelle électrique le commencement et la fin d'un phénomène, nous connaîtrons sa durée avec une approximation qui dépendra de la fraction d'une ondulation que nous pouvons encore apprécier; mais on conçoit déjà qu'il n'y aura pas de grandes difficultés à mesurer un intervalle de temps avec une exactitude du cinq-millième de seconde.

Dans les appareils où tout doit aller très vite, l'électricité joue, on le comprend, un rôle important. Nous saurons mieux ce qu'on peut en attendre lorsque nous aurons examiné la photographie que représente la fig. 2, et qui n'est autre que celle d'une balle de fusil, prise à proximité de l'arme, et traversant l'air à la vitesse de 600 mètres par seconde [1]. On voit que la balle est parfaitement nette à la tranche de son culot, et on en conclut qu'elle n'a guère franchi plus d'un dixième de millimètre pendant la durée de la pose. Celle-ci n'a donc pas dépassé 1/6 000 000 de seconde, et, si l'on voulait découvrir un objectif pendant un temps aussi court, il faudrait donner à l'obturateur une vitesse qui le rendrait mille fois plus destructeur qu'une balle de fusil.

1. Cette photographie a été faite par M. C.-V. Boys, membre de la Société Royale de Londres.

Voici donc comment on procède : on dirige l'arme de telle sorte que la balle coupe au passage deux fils faisant

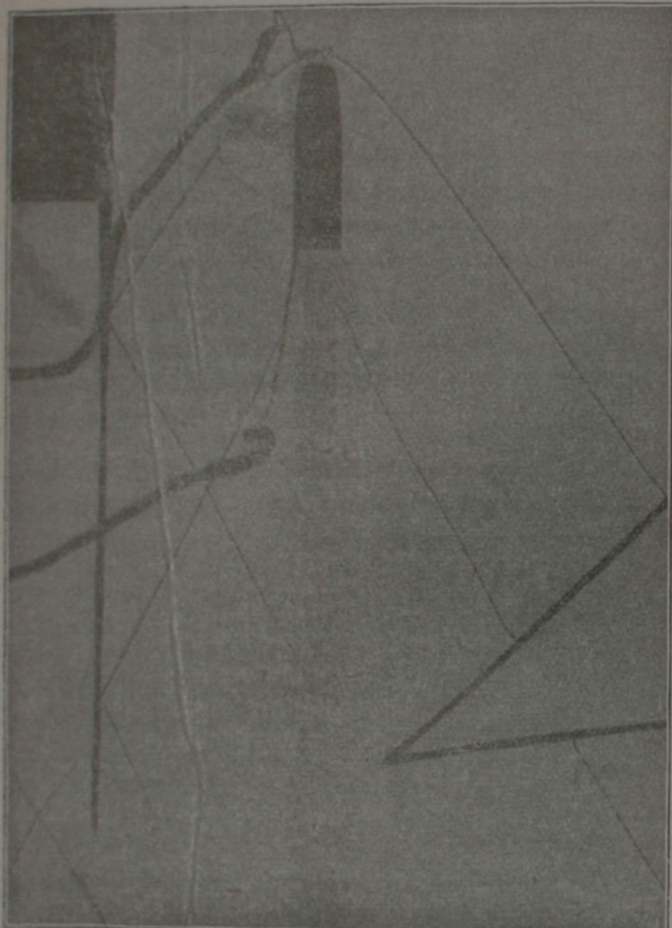


Fig. 2. — Une balle de fusil est accompagnée, dans son vol, d'ondes aériennes et suivie d'un sillage.

partie d'un circuit, dans lequel éclate alors une étincelle électrique extrêmement brève. Celle-ci projette sur la plaque l'ombre de la balle, dont on a dès lors la silhouette. Bien entendu, à part la difficulté vaincue, ce n'est pas dans l'image de la balle que réside l'intérêt de cette photographie : il est tout entier dans ce qui se passe autour d'elle, et que l'on voit nettement sur notre figure. A la tête et au culot de la balle naissent deux lignes obliques, projections des limites du cône formé par les ondes aériennes qui, partant de la balle, surgissent brusquement dans l'air et le refoulent. Puis, immédiatement derrière la balle, on voit un remous analogue au sillage d'un bateau.

L'étude détaillée de ce phénomène nous entraînerait trop loin et nous éloignerait de notre but. Nous voulions seulement montrer combien nous sommes mieux organisés, pour mesurer le temps ou le découper en tranches minuscules, qu'à l'époque où Galilée comparait la durée des oscillations d'un pendule à celle de ses pulsations.

Nos jeunes lecteurs souriront peut-être en pensant à un aussi piètre outillage, eux qui ont probablement, dans leur gousset, une montre marquant les secondes. Mais aussi qu'ils admirent les hommes dont le génie pénétrant a su découvrir, avec d'aussi maigres ressources, tant de choses cachées. Si notre époque récolte une superbe moisson, c'est que les siècles précédents l'ont semée, qu'ils ont labouré une terre d'où sortent aujourd'hui à profusion les épis et les gerbes.

7. — L'induction et la déduction.

Un autre moyen de découverte est la déduction, c'est-à-dire le travail de la pensée suivant une cause jusqu'à ses effets, et devinant, par ses seules ressources, la marche d'un phénomène.

C'est ainsi que procèdent toujours les mathématiciens, avec cette différence que le point de départ de leur méditation n'est pas une *cause* proprement dite : c'est un axiome ou un postulat. Mais on n'a pas toujours opéré ainsi; il y a quelques siècles, lorsqu'on voulait connaître la superficie embrassée par une courbe, on dessinait cette courbe sur du carton, on la découpait, puis on pesait le morceau ainsi isolé du reste. Galilée, dont le nom revient décidément bien souvent dans cette initiation (cette fois n'est pas la dernière), découvrit par ce procédé expérimental des relations fort intéressantes. Là encore, il fallait guider l'esprit et le mettre dans la bonne voie, avant qu'il pût continuer seul sa route.

Dans l'étude de la nature, on peut procéder quelquefois comme les géomètres, et se borner à raisonner, même lorsque l'expérience est facile.

Prenons, dans la physique, un exemple d'expérimentation et de déduction appliquées au même phénomène.

Sans insister sur les procédés, nous savons que l'on peut mesurer l'éclairement d'une surface, c'est-à-dire la quantité de lumière qu'elle reçoit sur une superficie donnée. Plaçons une bougie à 1 mètre d'un mur, puis cherchons combien il faudra mettre de bougies à 2 mètres pour produire le même éclairement; nous en trouverons 4; à 3 mètres, nous en trouverons 9, et ainsi de suite. Bien entendu, si notre expérience nous révèle de petites différences, nous appliquerons le principe de simplification, et nous dirons que, au degré où nous voulons pousser notre investigation, les rapports approximatifs nous suffisent.

Posons maintenant les deux séries de nombres :

Distances.	Nombres de bougies.
1	1
2	4
3	9

Nous voyons que les derniers sont les carrés des premiers, et nous en concluons que l'éclairement d'une surface diminue, lorsque la distance du luminaire augmente, proportionnellement au carré de cette distance.

Cette relation est la première des lois photométriques. Un instant de réflexion nous aurait permis de la prévoir.

Représentons la flamme de la bougie par un point, et plaçons, par le raisonnement, à une certaine distance de ce point, une surface plane carrée, au centre de laquelle tombe la perpendiculaire abaissée du point sur le plan. La lumière, que nous supposons partie du point O (fig. 3) pour éclairer le plan, est contenue à l'intérieur d'une pyramide O ABCD. Retirons maintenant le plan, et remplaçons-le, à une distance double, par le plan EFGH. Ce dernier a une surface quadruple de celle du premier; comme il ne reçoit pas plus de lumière au total, il est quatre fois moins éclairé. Ainsi, la loi photométrique devient évidente.

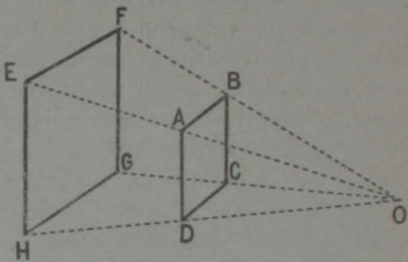


Fig. 3. — La loi photométrique est évidente.

La déduction, en prenant une minute de notre temps, nous a dispensés de faire une expérience qui, pour être concluante, nous aurait pris quelques heures. Elle a donc, sur cette dernière, une grande supériorité; mais elle en possède une autre. Notre mode de raisonnement nous a enseigné que la loi photométrique est vraie si toute la lumière reçue par la première surface se retrouve sur la seconde. Si donc nous avions opéré dans la brume, la loi n'aurait plus été vraie. L'expérience nous aurait donné alors des résultats très compliqués, que nous aurions eu beaucoup de peine à débrouiller, et dont le raisonnement nous fait au moins pressentir le sens.

Alors, dirons-nous, puisqu'il est facile de découvrir des lois par le simple raisonnement, pourquoi n'a-t-on pas toujours recours à un procédé aussi commode et aussi économique? Uniquement parce que les problèmes ne sont pas toujours simples; et les idées que nous pouvons nous en faire sont presque toujours incomplètes.

Nous savons déjà combien il faut nous méfier de ce que nous voyons; mais combien existe-t-il de choses que nous ne voyons pas? L'homme de science, plus peut-être que tout autre, doit avoir toujours présente à l'esprit cette parole d'Hamlet : « Il y a plus de choses dans le ciel et sur la terre, Horatio, que n'en rêve votre philosophie »

Même très perspicaces, nous pouvons toujours oublier un facteur, souvent insignifiant, mais parfois essentiel dans des circonstances particulières.

Le raisonnement nous dit que la surface d'un liquide en repos est parfaitement plane, et, en général, l'observation nous donne raison. Cependant, si nous laissons tomber du mercure sur une table, il se divise en gouttelettes sphériques; cette simple expérience nous montre que, dans notre raisonnement, nous n'avions pas pensé à tout. Nous avions oublié une force généralement insignifiante, mais qui parfois gouverne le phénomène.

Le sentiment inconscient qu'il existe des causes ignorées engendre la superstition; ce sentiment, devenu conscient, engage à ne nier qu'avec prudence. Cependant, il faut savoir affirmer que tout n'est pas possible. Dans ses célèbres *Récréations mathématiques et physiques*, Ozanam donne une recette pour « préparer un onguent par le moyen duquel on pourra guérir une playe sans en approcher » et que Paracelse appelle *onguent aux armes*. Lorsqu'on plonge dans la mixture bizarre dont il donne la formule l'arme qui a occasionné la plaie, celle-ci guérit, ainsi que l'affirme Glocenius. Et cependant nous nions, car l'absence de toute cause de guérison est ici tellement évidente que le bon sens se refuse à l'admettre.

Si les procédés de la pensée scientifique sont, en général, plus pénétrants et plus sûrs que ceux de la pensée vulgaire, en revanche, l'homme de science ne saurait en effet accomplir une découverte sans appliquer à toute la conduite de sa pensée le bon sens qui le dirige dans les actes ordinaires de la vie. Il n'y a pas de démarcation nette entre le travail scientifique et le travail journalier[1]. La

1. « C'est une grande erreur de croire que les vérités scientifiques diffèrent essentiellement des vérités vulgaires. Elles n'en diffèrent que par l'étendue et la profondeur... Un œil armé d'un

science n'est pas une magie particulière, elle est la continuation perspicace et logique de l'observation et de la réflexion quotidiennes.

La connaissance complète des causes nous permettrait de bâtir complètement les phénomènes dans notre esprit. Nous pouvons imaginer les causes, ou bien nous pouvons les conclure de leurs effets; ce procédé est l'*induction*; mais là aussi, il faut opérer avec prudence, car le même effet peut être produit par bien des causes différentes; les démêler dans le cas d'un crime est tout l'art d'un juge d'instruction. Vulgaires ou savants s'y trompent également, avec plus ou moins de grossièreté, là est toute la différence.

Lorsque le chemin de fer traversa pour la première fois la steppe, les paysans crurent voir le diable en personne. Or, comme ils savaient que les saintes icônes chassent l'esprit malin, ils s'en allèrent en procession s'agenouiller sur la voie, et, lorsqu'ils virent arriver le train, ils élevèrent les images protectrices. Le monstre sembla hésiter, ralentit sa course, et s'arrêta avant d'atteindre ces pauvres gens. Ils s'en retournèrent à leurs isbas, très édifiés, et persuadés que les icônes avaient, une fois de plus, vaincu le mal; jamais il ne put leur venir à l'idée que le mécanicien n'avait pas voulu écraser ses frères.

Les savants ne voient plus guère le diable dans leurs cornues, pas plus qu'ils ne le cherchent sous leur scalpel; un Faust moderne appellerait à son aide tout autre que Méphistophélès; l'un des caractères de l'esprit scientifique est qu'il progresse et rejette définitivement certaines erreurs, après en avoir été dupe.

Un bourgeois de Berlin, rentrant un soir, se buta, dans l'obscur escalier, à un cambrioleur qui, surpris dans son travail, cherchait à gagner le large. Pris à bras le corps, le voleur se débarrassa de son gêneur en lui assénant un formidable coup de poing. Un individu suspect fut arrêté, que le paisible citoyen reconnut sans hésitation.

microscope n'en est pas moins un œil humain. Il voit plus que les autres yeux, il ne voit pas autrement ». (ANATOLE FRANCE : *Le Jardin d'Épicure*).

« Comment avez-vous pu le voir dans l'obscurité, questionna le juge.

— Son coup de poing me fit voir trente-six chandelles, et c'est à leur pâle lueur que j'ai pu l'apercevoir de l'autre œil resté ouvert. »

Consulté, le célèbre physiologiste Müller déclara le phénomène possible. Puisque, dit-il, on voit de la lumière, c'est qu'il en existe. Pourquoi, dès lors, ne pourrait-elle pas sortir de notre œil, où elle entre si facilement?

Le prétendu voleur fut condamné; mais Müller à l'encontre des paysans russes, gardait un doute; il expérimenta, reconnut qu'il s'était trompé, et formula une importante loi physiologique.

Nous allons chercher maintenant, en utilisant tour à tour l'un ou l'autre des procédés de découverte, à nous faire une idée des lois qu'étudie la mécanique. Les expériences que nous ferons, les raisonnements auxquels nous soumettrons les causes des phénomènes, nous permettraient, à la rigueur, de découvrir les vérités de la science, si elles n'étaient déjà connues. Mais notre seul mérite, en travaillant ainsi ensemble, sera très analogue à celui d'un groupe de touristes explorant un pays dont ils possèdent la carte, et qui est sillonné de bonnes routes à chaque carrefour desquelles se trouve un poteau indicateur. Lorsque nous aurons excursionné dans ce pays, nouveau pour nous, notre admiration sera très grande pour les pionniers qui le défrichèrent, pour les ingénieurs qui en dressèrent la carte ou qui en tracèrent les voies de communication. Si, de plus, nous avons appris à le bien connaître, nous y aurons gagné, avec la joie d'avoir aperçu d'admirables perspectives, une plus grande facilité à nous orienter, par une future exploration, dans un pays plus agreste, où parfois encore les sentiers sont sans issue, où souvent la brume enveloppe les sommets.

CHAPITRE DEUXIÈME

LE MOUVEMENT

8. — Comment on peut définir la vitesse.

Ainsi que nous le verrons, les mouvements tiennent, dans la mécanique, une place très importante; nous aurons besoin d'en connaître parfaitement la nature, et ce que nous avons de mieux à faire, c'est de les étudier d'abord pour eux-mêmes. Nous serons détournés pour un instant encore du principal objet de notre étude, mais celle-ci deviendra plus facile et plus fructueuse. En perdant un peu de temps maintenant, nous en gagnerons beaucoup dans la suite.

A première vue, nous ne trouvons aucune difficulté à caractériser complètement un mouvement. Connaissant la vitesse d'un mobile et sa direction, nous savons d'où il vient, où il va, et en combien de temps il parcourra un espace donné. Sa vitesse pourra, il est vrai, nous être indiquée en mètres par seconde, en kilomètres par heure ou dans d'autres unités encore; mais le passage de l'un des systèmes à l'autre est une simple question d'arithmétique, et cela ne nous arrêtera pas un instant.

Cependant, lorsqu'on nous dit qu'un train marche à raison de 60 kilomètres à l'heure, sommes-nous sûrs d'avoir bien compris?

Non, si cette indication est isolée, car elle peut avoir, pour un voyageur, plusieurs sens distincts. Nous pouvons dire en effet : le voyage de Marseille à Paris s'est effectué à une vitesse de 60 kilomètres à l'heure; ou bien : l'express de Marseille, arrivant en gare de Dijon à la vitesse de 60 kilomètres à l'heure, est entré en collision avec une rame de wagons de marchandises. Dans le premier cas, on veut dire que le nombre total des kilomètres séparant Marseille de Paris, divisé par le nombre d'heures du voyage, donne pour quotient 60; dans le second, on entend que, si le train avait poursuivi son mouvement à vitesse constante, il aurait parcouru 60 kilomètres dans une heure.

Le premier calcul donne ce que l'on nomme la *vitesse commerciale* : elle se compose d'un ensemble de toutes sortes de vitesses, depuis l'arrêt jusqu'à la marche maxima, en palier, dans les sections rectilignes de la voie.

S'il n'y a pas eu d'arrêt, mais seulement des variations dans le régime du mouvement, la vitesse, calculée comme nous venons de le faire, prend le nom de *vitesse moyenne*. Les minutes successives ne seront pas marquées par la distance des bornes kilométriques de la voie : certaines minutes donneront plus d'un kilomètre, d'autres donneront moins.

Nous pouvons marquer la position de l'avant du train au bout de chaque minute, et diviser ensuite en soixante parties égales les intervalles de ces points; chacun des nouveaux intervalles ne sera pas parcouru exactement en une seconde; mais cependant, les écarts seront relativement plus faibles que pour les minutes; et, si nous subdivisons encore le temps, la différence des chemins parcourus dans deux durées consécutives sera insensible; il faudra, pour reconnaître une différence, prendre deux durées égales, suffisamment éloignées.

Prenons maintenant le chemin parcouru dans un de nos petits intervalles, d'un centième de seconde par exemple, ou moins encore si le mouvement est rapidement variable, et divisons-le par la valeur de cet intervalle de temps.

nous aurons une vitesse qui sera bien définie pour un très petit parcours, et que nous nommerons la *vitesse instantanée*. C'est cette vitesse qui nous intéresse si nous voulons connaître les effets d'une collision. Si notre mobile a parcouru 2 décimètres en un centième de seconde, nous dirons que sa vitesse est de 20 mètres par seconde. Lorsqu'on l'exprime en kilomètres à l'heure, on sacrifie évidemment la rigueur à l'habitude.

Il ne convient pas, en effet, que le temps auquel on applique le résultat soit énormément plus grand que celui pendant lequel a duré le phénomène. Par exemple, dans la mesure de la vitesse d'un projectile au sortir de l'arme, on opère sur des parcours qui varient entre 10 et 50 mètres, et obligent à mesurer des intervalles de temps extrêmement brefs. Les vitesses sont alors exprimées en mètres par seconde, bien qu'en réalité le projectile ne parcoure pas, dans une seconde, le chemin qu'indiquerait cette vitesse. Aussitôt sorti de l'arme, son mouvement se ralentit en effet, et la vitesse initiale qui est indiquée correspond au chemin qu'il ferait s'il se déplaçait d'un mouvement uniforme. On se comprend cependant, lorsqu'on dit qu'un projectile a une vitesse initiale de 600 mètres par seconde; et, comme la seconde est la plus petite unité de temps usuelle, on s'en tient là. Mais on tomberait dans le ridicule si on partait de cette vitesse mesurée à la bouche de l'arme pour dire que le projectile fait 36 kilomètres par minute, ou 2 160 kilomètres à l'heure.

C'est cependant un peu dans cette exagération que tombent les automobilistes, lorsqu'ils parlent d'une vitesse de 160 kilomètres à l'heure sur le kilomètre lancé. En réalité, le chauffeur a parcouru un kilomètre unique en 22 secondes et demie, et personne ne contestera que ce soit fort honorable; mais cela ne veut pas dire que ni sa machine, ni ses caoutchoucs, ni lui-même soutiendraient cette vitesse pendant une heure.

Un homme de médiocre fortune pourrait dire avec presque autant de raison : « J'ai vécu sur le pied de 10 millions par an.... pendant une minute ». Cela voudrait dire simplement qu'il a passé une minute à faire une emplette de vingt francs.

En mécanique, nous ignorerons la vitesse commerciale. puisque nous ne ferons ni voyages, ni exploitation de chemins de fer; même la vitesse moyenne nous intéressera peu; tout notre intérêt se concentrera sur la vitesse instantanée, et un peu de bon sens nous préservera du léger ridicule qui consisterait à l'exprimer en unités qu'elle doit ignorer.

Mais la notion de vitesse cache quelques difficultés plus sérieuses, que nous allons aborder.

9. — Vitesse relative et vitesse absolue.

Si, au lieu de voyager dans un train, nous naviguions par le brouillard, nous estimerions notre vitesse au loch ou aux tours de l'hélice, et nous penserions encore être parfaitement renseignés. Cependant, si nous venions des Antilles en Europe, et si nous avions calculé notre route en multipliant notre vitesse moyenne par le temps du voyage, nous aurions l'agréable surprise d'apercevoir les côtes du vieux Continent bien avant l'heure prévue. C'est que (nous n'aurions certes pas le droit de l'ignorer), en plus de ses propres moyens, notre bateau aurait eu, pour le transporter, le Gulf-Stream, ce puissant courant qui part du golfe du Mexique, et apporte à nos côtes l'eau et l'air tièdes auxquels nous devons la douceur du climat européen.

Prenons un autre exemple. Durant les tempêtes qui abattent les cheminées et déracinent les arbres, on peut éprouver la sensation du repos complet; il suffit, pour cela, de monter en ballon libre. Si le sol est caché aux aéronautes par les nuages ou par la nuit, ils peuvent ignorer leur marche, et se trouver transportés de Paris aux frontières de Russie sans perdre l'illusion d'avoir plané tranquillement au-dessus de leur point de départ.

Que signifie pour le navigateur la vitesse? Dans les fleuves, ces « routes qui marchent », suivant la pittoresque et célèbre expression de Pascal, elle sera bien différente, s'il la calcule par rapport à l'eau ou au rivage [1]; pour les aéronautes, la notion de repos ou de mouvement pourra être inverse, suivant qu'ils l'entendent par rapport au sol ou à l'air qui les entraîne. En vue de la terre, ils peuvent avoir conscience d'une course vertigineuse; si le sol leur est caché, ils déterminent leur vitesse laborieusement par l'observation des astres.

Tant qu'il est à terre, un aéronaute prendra le sol comme point fixe; en l'air, ce sera le ballon ou le fluide ambiant.

Nous pourrions convenir une fois pour toutes que l'aéronaute est le jouet d'une illusion, tout comme le navigateur, et qu'il est fixe s'il est immobile par rapport au sol, en mouvement s'il voit la terre se déplacer.

Ce fut, inconsciemment, la définition qu'adopta toute l'Antiquité. Il était hors de discussion, pour les hommes d'autrefois, que la terre était le grand plateau immobile constituant le monde proprement dit, dont tout le reste de l'univers ne pouvait être qu'un petit accessoire. Aussi longtemps que l'on ne connaissait ni les dimensions, ni la distance des astres, il était très naturel de penser qu'ils tournent autour de la terre en une course éternelle. Mais nous savons aujourd'hui qu'un obus poursuivant sa route avec une vitesse constante, n'atteindrait l'étoile la plus voisine de nous qu'après des milliers d'années, tandis qu'il ferait le tour de la terre en moins d'un jour.

Nous pourrions, le sachant, supposer cependant que les étoiles tournent autour de la terre; mais il serait moins absurde, pour un aéronaute voyant la terre défiler à ses pieds, de s'imaginer qu'elle s'en va, et qu'il est en repos.

Depuis que Copernic, Kepler et Galilée ont édifié un système du monde conforme au bon sens, nous admettons que la terre tourne sur elle-même; nous pensons, de plus, qu'elle effectue en une année sa révolution autour du soleil; elle n'est donc pas en repos, et nous ne pouvons

1. On ne peut pas plus gouverner en se laissant aller au fil de l'eau, qu'on ne peut faire tourner un bateau au repos sur un lac rien qu'en agissant par son gouvernail.

plus dire qu'un corps est immobile lorsqu'il n'éprouve aucun déplacement par rapport au sol.

Où donc trouverons-nous le repère de l'immobilité? Les astronomes avaient pensé pouvoir nous le dire, lorsqu'ils avaient classé les astres en deux catégories : les étoiles fixes et les astres errants, soleil, planètes et leurs satellites, comètes.

Mais la science nous a enlevé encore cette illusion; des observations précises ont montré que les groupements constitués par les étoiles se déforment. Vues de la terre, ces dernières possèdent des vitesses dirigées dans tous les sens, mais avec un mouvement d'ensemble assez marqué pour que nous sachions que notre système solaire tout entier s'en va, avec une vitesse fantastique, vers un point de la constellation d'Hercule.

Le repos nous échappe donc de plus en plus; et, puisque nous ne le trouvons nulle part, nous sommes débarrassés de sa recherche qui nous apparaît comme vaine. Nous reprenons donc notre liberté, et, disant que le repos et le mouvement sont des conventions, nous choisirons comme repère tout ce que nous voudrons : la cabine bien close du navire qui nous emporte, l'atmosphère avec le ballon qui nous y soutient, le fleuve sur lequel nous naviguons et dont les rives nous sont cachées, la terre, le soleil, un groupe d'étoiles, bref, ce qui nous sera le plus commode et nous conduira à des conceptions simples. Mais nous n'oublierons pas que nous sommes dans la pure convention [1].

Rien n'est facile, au surplus, comme de nous tromper sur le repos et le mouvement. Il y a quelques années, un ingénieux industriel exhibait dans les fêtes ce qu'il nommait l'escarpolette diabolique. C'était, à l'intérieur d'une pièce complètement close, une sorte de nacelle suspendue

1. Les physiciens ont cependant trouvé un repère qui semble beaucoup plus fixe que les autres. C'est l'éther qui transmet la lumière et les actions électro-magnétiques. Cela ne semble pas une fiction; mais, en mécanique élémentaire, nous devons encore l'ignorer.

à des tringles, et dans laquelle cinq ou six personnes pouvaient prendre place. Lorsqu'elles étaient assises, on commençait à donner à toute la pièce un mouvement d'oscillation, alors que l'escarpolette restait immobile. Il était curieux de voir alors les personnes se pencher à droite ou à gauche, comme pour se maintenir verticalement sur l'escarpolette, qu'elles croyaient sentir osciller. Puis lorsque, après quelques balancements de plus en plus étendus, la chambre faisait rapidement un tour complet, l'illusion cessait brusquement, mais non sans que les personnes eussent éprouvé un effroi qui se traduisait souvent par des cris perçants.

10. — L'illusion dans l'observation des mouvements.

La discussion faite au paragraphe précédent a entraîné pour nous cette conviction que le repère du repos ou du mouvement est arbitraire. Toutefois, nous avons le sentiment qu'il l'est plus ou moins, et qu'il serait absurde, lorsque nous voyons un poulet tourner à la broche, de prétendre que le foyer, et la maison, et la ville, et la terre, et l'univers tournent autour de lui. Une telle conception pourrait être celle d'une mouche qui réussirait, le feu étant tombé, à se tenir sur le poulet; mais ce ne serait certainement pas la nôtre [1].

Cette question s'éclaircira encore lorsque nous nous serons rendu compte de la nature des observations qui nous révèlent le mouvement. Étudions d'abord l'action du milieu.

Supposons deux ballons dirigeables, marchant avec des vitesses égales et notables sur deux routes droites et parallèles. Si la terre leur est cachée, chacun d'eux aura

1. Si cependant le tournebroche perdait son régulateur, le poulet pourrait s'emballer et projeter la mouche à l'extérieur; la force centrifuge révélerait alors, sans aucun doute possible, la réalité de la rotation; nous verrons bientôt que, si la vitesse est toujours relative, l'accélération ne l'est pas; et la rotation comporte une accélération de direction.

pour seul repère visible l'autre ballon; et, comme il le verra toujours dans la même direction et à la même distance, il pourra le croire en repos. En fait, les ballons seront en repos relatif, et ils constitueront l'un pour l'autre le repère du repos.

Mais supposons que, la nuit venue, les aéronautes, marchant toujours de conserve, se signalent l'un à l'autre par des coups de sifflet. Nous savons, pour l'avoir souvent observé, que le son ne se transmet pas instantanément; lorsqu'un train siffle au loin, nous voyons le petit panache de vapeur s'élever sur la locomotive et s'évanouir sans que nous ayons rien entendu, puis le coup de sifflet frappe notre oreille alors que la vapeur a déjà disparu.

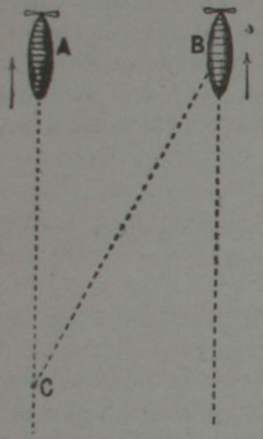


Fig. 4. — Pour deux ballons marchant de conserve, il n'est pas indifférent de voir ou d'entendre.

Ainsi, le coup de sifflet parti du ballon A (fig. 4) atteindra le ballon B à un endroit de sa course placé en avant de celui où il se trouvait au moment où le son a été émis. Le ballon B ne percevra pas un son venant de la direction du ballon A, mais bien un son venant du point C où se trouvait le ballon A au moment où il est parti. En d'autres termes, les aéronautes du ballon B penseront que le ballon A est resté en arrière. Plus la vitesse des ballons sera considérable, plus le retard sera grand; et si, à un moment donné, les deux ballons accélèrent simultanément leur marche, chacun croira que l'autre a pris du retard. Cependant, dès qu'ils pourront s'apercevoir de nouveau, ils constateront qu'ils sont par le travers l'un de l'autre, et les aéronautes verront qu'ils ont été dupes d'une illusion.

Le résultat singulier auquel nous a conduits cette expérience nous montre que, dans l'observation du mouvement, il est essentiel de tenir compte de la vitesse de transmission des signaux; si, dans le cas des observations acoustiques, nous sommes sujets à de graves erreurs, c'est parce que la vitesse du son, bien que supérieure à celle de la plupart des mouvements à la surface de la terre, est cependant encore faible. La vitesse de la lumière, au contraire, qui est très peu inférieure à 300 000 kilomètres par seconde, est immense par rapport à la vitesse de tous les corps visibles à la surface de la terre, et aussi de tous les corps célestes. C'est pourquoi, lorsque nous observons un corps terrestre en mouvement, ou lorsque nous nous déplaçons d'un mouvement parallèle à celui d'un autre mobile, nous pouvons affirmer qu'il est, sinon exactement à l'endroit où nous le voyons, du moins si près de cet endroit que nous sommes incapables d'apprécier la distance qui sépare sa vraie position de celle dans laquelle nous le voyons.

Revenons aux signaux acoustiques. Tous ceux qui ont assisté à des tirs ont entendu le singulier sifflement des balles ou des obus, bien différent d'ailleurs pour celui qui tire et pour celui vers qui viennent les projectiles.

Dans les guerres d'autrefois, où les balles étaient de fort calibre, mais n'avaient qu'une faible vitesse, l'infanterie entendait, de part et d'autre, les balles arriver, précédées par leur sifflement. Les soldats de Napoléon avaient coutume de saluer les balles passant au-dessus de leur tête en disant : « Celle-ci n'est pas pour nous, elle est pour d'autres ».

Avec les projectiles modernes, dont la vitesse, au moins pendant une bonne partie de leur parcours, est supérieure à celle du son, la balle est toujours en tête de son sifflement, et atteint l'homme visé ou passe à côté de lui avant qu'il l'ait entendue.

Supposons un projectile d'artillerie qui passe à une certaine hauteur au-dessus de notre tête, marchant avec une vitesse double de celle du son, qui est elle-même de 330 mètres par seconde environ. Pendant le temps que le son emploie à venir du point A (fig. 5), où se trouve le projectile à un moment donné, au point B où nous sommes, le projectile a effectué le parcours AC. Nous croyons donc entendre l'obus en A, alors qu'il est déjà en C.

Nous pouvons, à ce propos, être l'objet d'une étrange illusion. Il est facile de voir que, dans les conditions de vitesse supposée, la durée totale du parcours du projectile de A en D et du son de D en B sera moindre que la durée de propagation du son de A en B. Nous entendrons donc le projectile en D avant de l'entendre en A. Il est clair aussi que le son parti de C nous arrivera après celui parti de D. Il existe donc un point de la trajectoire duquel nous percevons le premier signal, et les sons partis de tous les autres points nous arriveront après. En d'autres termes, le projectile semblera avoir pris naissance en un point déterminé de sa trajectoire, et s'être divisé immédiatement en deux projectiles qui vont en s'écartant, l'un marchant vers le canon, l'autre vers le but [1].

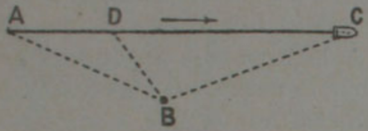


Fig. 5. — Nous entendons un projectile loin de l'endroit où il se trouve.

Cet exemple nous montre avec quelle prudence nous devons aborder l'étude du mouvement. Assurément, en nous servant de signaux optiques, nous ne serons point sujets à l'erreur, tant que nous observerons des objets terrestres. Mais il n'en est pas de même pour les objets célestes. Nous croyons voir une étoile en un point déterminé du ciel; or, pour la plupart de celles que nous apercevons, le signal ne nous arrive qu'après des années, et même des centaines ou des milliers d'années. Pendant le trajet qu'a fait la lumière, la terre a tourné des milliers de fois sur elle-même, et a parcouru des milliards de kilomètres. L'étoile que nous observons est donc loin de l'endroit où nous la voyons.

Bien plus, parfois une étoile paraît, brille pendant

1. M. Durand-Gréville a fait observer que l'explosion fréquemment attribuée aux bolides n'a pas d'autre cause qu'une illusion analogue.

quelque temps au ciel, puis s'éteint. C'est ainsi que, le 21 février 1901, une superbe étoile inconnue jusque-là fut observée dans la constellation de Persée, augmenta rapidement d'éclat, puis baissa et s'éteignit. L'étude qu'on put en faire pendant les quelques mois de son éphémère existence permit de déterminer sa distance à la terre, et de calculer le temps qu'avaient mis ses rayons à nous parvenir. On reconnut ainsi qu'à une distance immense, une effroyable conflagration s'était produite au temps d'Henri II.

La durée de transmission des signaux n'est pas la seule cause de nos erreurs dans l'étude du mouvement; l'imperfection de nos sens s'y ajoute puissamment. Le cinématographe nous montre jusqu'à quel point la succession d'images au repos peut nous donner l'illusion du mouvement. Une illusion analogue nous conduit à penser que les vagues s'avancent vers le rivage, alors que chaque particule d'eau se soulève et retombe en décrivant une courbe fermée. Inversement, un disque poli, dont aucune particularité ne retient le regard, peut tourner, vite ou lentement, sans que nous nous en doutions. Ainsi le repos, comme le mouvement, peut n'être qu'apparent.

Nous n'aurions pas pensé que l'observation du mouvement cachât tant de difficultés et conduisît si loin. Nous allons maintenant en poursuivre l'étude en nous aidant d'un peu de mathématiques, heureusement faciles et de courte durée.

11. — Chemin, temps, vitesse, accélération.

La définition que nous avons donnée de la vitesse nous conduit immédiatement à son expression algébrique :

$$\textit{vitesse} = \frac{\textit{chemin parcouru}}{\textit{temps du parcours}}; \quad v = \frac{l}{t}.$$

Si l est, par exemple, la distance de Paris à Marseille, t la durée du voyage, v sera la vitesse *commerciale*; entre deux gares, ce sera la vitesse *moyenne*; enfin, si nous prenons un tout petit parcours dans un tout petit temps, v sera la vitesse *instantanée*. En toute rigueur, il faut, pour que l'expression ci-dessus soit celle de la vitesse instantanée, que l et t soient tous deux infiniment petits; v est alors ce qu'on nomme la *dérivée* du chemin par rapport au temps. Ne nous effrayons pas de cette expression de « dérivée », qui ouvre la porte aux mathématiques supérieures; nous n'en franchirons pas le seuil, mais il était bon que le sens de ce terme nous fût connu.

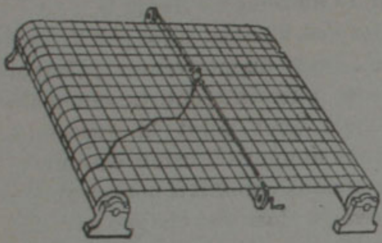


Fig. 6. — Tracé du diagramme des marches.

Lorsqu'on veut posséder un document authentique relatif aux marches d'un train, on fait tracer un diagramme qui renferme tout ce que l'on veut savoir[1]. Pour obtenir un semblable diagramme, il suffit d'installer sur la locomotive ou sur un fourgon un appareil dont le principe est le suivant.

Un mouvement d'horlogerie entraîne une feuille de papier (fig. 6) qui s'enroule sur un tambour. Dans le sens perpendiculaire au mouvement du papier, un crayon ou une molette se déplace sous l'action de la roue, qui, en tournant, actionne des engrenages réducteurs, et finalement une chaîne portant l'inscripteur. Lorsque le train est arrêté, celui-ci reste en place, et trace un bout de ligne droite, parallèle au mouvement du papier; lorsque le train va très vite, le crayon monte rapidement le long de la feuille, et trace une ligne fortement oblique. Si le train recule, la ligne est descendante; elle passe par son point le plus bas au moment du changement de sens du mouvement, et remonte dès que la marche reprend son sens normal.

Supposons que chaque carré du papier corresponde à 5 minutes dans le sens de son mouvement et à 5 kilo-

1. On trouvera, aux § 56 et suivants de l'*Initiation mathématique*, de nombreux exemples de calculs faits à l'aide de diagrammes.

mètre dans le sens perpendiculaire. Analysons notre diagramme (fig. 7). Il indique d'abord (AB) un arrêt de trois minutes, puis la mise en marche, l'augmentation de la vitesse, qui est bientôt de 1 kilomètre par minute (CD);

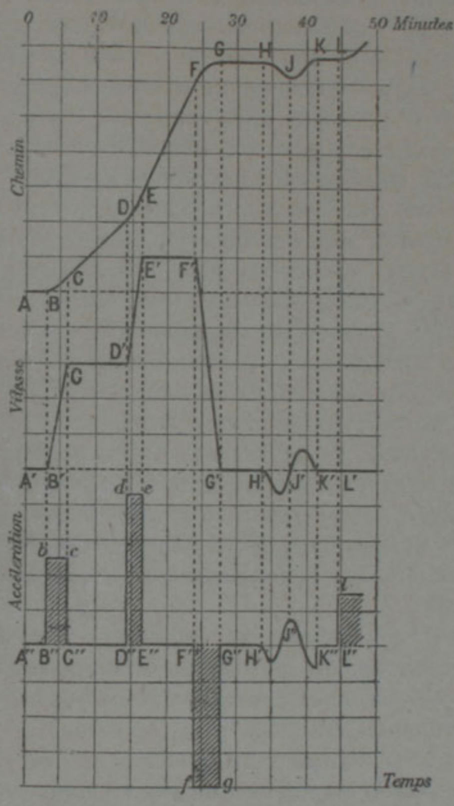


Fig. 7. — Diagramme du chemin, de la vitesse et de l'accélération.

nouveau changement de vitesse, on arrive à la limite actuelle, qui est de 2 kilomètres par minute ou de 120 kilomètres à l'heure (EF); ralentissement, arrêt (GH), recul pour une manœuvre (HJ), retour sans arrêt en J, courte station (KL), enfin départ de la gare.

De B en G, le déplacement est de 33 kilomètres en

25 minutes; la vitesse moyenne dans cet intervalle est donc de 79 kilomètres à l'heure.

Si nous voulons calculer la vitesse moyenne entre H et K, nous la trouvons nulle, puisque le chemin parcouru est nul lui-même, et cependant le train a manœuvré; il n'y a cependant pas contradiction entre le calcul et la raison, car on convient de dire que, de H en J, la vitesse a été négative; jusque-là, l'enregistreur avait compté, dans cette section il a *décompté*. Bien entendu, cette notion de vitesse négative a un sens très particulier. Si, entre H et J, le train était entré en collision avec des wagons en station, les voyageurs auraient estimé que la vitesse était bien positive; c'est là une subtilité que nous nous bornons à inscrire, et qui s'éclaircira plus tard. Si nous voulons connaître la vitesse instantanée, nous prenons deux points de la courbe extrêmement rapprochés, et même, en poussant à la limite, deux points infiniment rapprochés; c'est alors l'inclinaison de la tangente à la courbe au point considéré qui nous donne la vitesse.

En regardant attentivement notre diagramme, nous avons pu ainsi en conclure non seulement les chemins parcourus par le train, seule indication qu'il donne immédiatement, mais encore les vitesses obtenues pour chaque section, en divisant la longueur par le temps employé à la parcourir.

Nous pouvons maintenant construire nous-mêmes un autre diagramme, qu'au surplus certains appareils très appréciés des automobilistes inscrivent eux-mêmes : c'est le diagramme des vitesses.

Portons, sur un nouveau quadrillage, les durées de gauche à droite, les vitesses de bas en haut. Pendant les arrêts, la vitesse est nulle; puis elle renaît et augmente jusqu'à une certaine valeur, constante dans la marche normale en palier. Lorsqu'on s'approche de l'arrêt en gare, la vitesse diminue et tombe bientôt à zéro. Pendant les manœuvres, elle peut devenir négative.

Et enfin, nous pourrons établir un troisième diagramme, qui sera le dernier. C'est celui des variations de la vitesse, ou, comme on dit, des *accélérations*, terme qui, dans le langage courant, désigne seulement l'augmentation de la vitesse, mais que nous étendrons à tous ses changements, en admettant que l'accélération peut devenir *négative*. Si nous avons voulu pousser jusque-là l'analyse du mouvement, c'est que l'accélération possède, pour toute la mécanique, une importance extrême, bien plus grande même que celle de la vitesse, comme des observations de tous les instants nous le montrent à l'évidence.

Lorsque nous nous trouverons dans un ascenseur à marche très douce, fermons les yeux, et efforçons-nous de découvrir ce que nous ressentons. Si nous y réussissons, nous aurons, au bout de très peu de temps, le sentiment qu'il nous est impossible de dire dans quel sens nous marchons. Mais, au moment où l'ascenseur s'arrête, nous croyons qu'il se met subitement à descendre. Pourquoi cela? Simplement pour l'ensemble des raisons qui nous avaient conduits à penser que tous les mouvements sont relatifs. Pour un temps, la cage de l'ascenseur, si elle est bien fermée, est notre petit univers, le repère du repos, et nous pouvons penser qu'il s'y trouve réellement. Mais, si l'ascenseur s'arrête, on peut dire qu'il recule par rapport au mouvement qu'il faisait l'instant d'avant, et c'est ce recul seul que nous sentons.

De même lorsque, dans un train lancé à bonne allure, on serre brusquement les freins, nous continuons notre mouvement en avant; et si, plongés jusque-là dans une lecture, nous pouvions ignorer totalement que le train marchait, nous sommes subitement rappelés à la réalité. Assurément, la vitesse du train avait pour nous une grande importance, puisque c'est pour l'utiliser que nous l'avions pris. Mais cette vitesse n'a, pourrait-on dire, qu'une importance commerciale ou vulgaire. Sa brusque variation nous a désagréablement rappelé qu'en mécanique celle-ci joue un rôle essentiel.

Lorsque la terre tremble, nous nous figurons que notre sol prend subitement de la vitesse; en réalité, la terre se meut dans son orbite avec une vitesse de 30 kilomètres par seconde; personne ne s'en douterait si les astronomes ne nous l'avaient révélé après des siècles d'observations et de réflexions; pour un observateur en repos, la cause des terribles catastrophes de San-Francisco ou de Sicile serait donc une infime variation locale de la vitesse.

Et maintenant que nous sentons toute l'importance de l'accélération, nous pouvons en tracer le diagramme.

Commençons par les portions de notre deuxième courbe où un trait horizontal nous dit que la vitesse ne varie pas. L'accélération est nulle par conséquent, et nous marquerons les sections A″ B″, C″ D″, E″ F″, etc. Lorsque la vitesse augmente (que le mouvement s'*accélère*), l'accélération est positive (B″ C″, D″ E″). Lorsqu'elle diminue, l'accélération est négative (F″ G″). Il y a ainsi une sorte d'opposition entre les deux diagrammes; les régions les plus intéressantes du second, c'est-à-dire les belles marches, sont les plus insignifiantes du troisième.

Nous pourrions, comme pour la vitesse, calculer une accélération instantanée qui est la dérivée de la vitesse par rapport au temps; ici cette dérivée varie brusquement.

Considérons encore une particularité intéressante du diagramme : la hauteur des segments de droites *bc*, *de*, indique l'accélération à l'instant considéré; additionnons ces accélérations, nous aurons l'accroissement total de la vitesse; cet accroissement est représenté par la surface enfermée dans les quadrilatères B″*bc*C″, D″*de*E″. Nous avons eu deux augmentations égales de la vitesse, qui est ensuite tombée à zéro ; l'effet indiqué par les premiers quadrilatères est donc annulé par l'effet de F″*fg*G″, qui correspond à l'arrêt; la surface de ce dernier est donc égale à la somme des surfaces des deux autres.

Comme le second, le troisième diagramme aurait pu être tracé automatiquement; nous en avons le sentiment, puisque les accélérations nous ont plus ou moins secoués. Lorsque nous aurons étudié de plus près les effets des accélérations, nous serons devenus capables d'inventer l'appareil permettant de les inscrire.

12. — Direction de la vitesse. Composition et décomposition des mouvements.

Nous sommes restés jusqu'ici au cas très simple du mouvement rectiligne; or nous ne sommes pas obligés, heureusement, de nous déplacer toujours dans la ligne droite. Pour décrire complètement un mouvement, nous devons connaître non seulement sa vitesse ou les changements de sa valeur, mais aussi les changements de sa direction. Le problème semble ainsi devenir horriblement compliqué; il l'est en effet; mais, grâce à un artifice souvent employé, nous pourrons le simplifier beaucoup.

Supposons qu'un ballon dirigeable, tout en marchant par ses propres moyens dans une direction déterminée, soit emporté par le vent dans une autre direction. Il prendra un mouvement moyen entre ceux que lui donnent respectivement ses hélices et le courant d'air dans lequel il se trouve. Si la terre lui est cachée, il ne connaît que son mouvement dans l'air, et il lui est impossible de savoir autre chose. Mais, si la terre est en vue, le pilote constate que le mouvement du ballon n'est pas celui que lui donne l'hélice. Il peut alors, en repérant ses passages en divers points de la carte, déterminer la direction et la vitesse du vent. Nous allons pouvoir le faire également, mais il nous est plus facile d'aborder le problème par l'autre côté.

Le vent souffle, par exemple, de A vers B (fig. 8) avec une vitesse de 20 kilomètres à l'heure. Le ballon en fait 40 dans l'air, en ayant mis le cap de A vers C. Tandis qu'il marche, toute la tranche d'air dans laquelle il navigue s'est déplacée de AC jusqu'en BD. C'est donc, en réalité, au point D que le ballon arrive. Et, si nous examinons la figure que nous venons de tracer, nous pouvons en conclure qu'un mobile animé simultanément de deux mouvements de directions différentes suit le chemin indiqué par la diagonale du parallélogramme représentant ces deux mouvements.

Le problème de la composition des mouvements étant ainsi résolu, nous comprenons comment l'aéronaute pilotant le dirigeable pourra connaître la direction et la vitesse du vent. Il savait qu'il aurait dû aller de A jusqu'à C. Il se

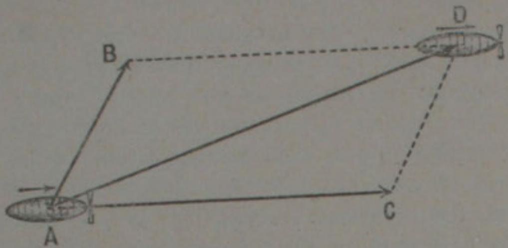


Fig. 8. — Un ballon dirigeable dévié par un vent oblique réalise la composition des vitesses.

trouve en D et il pense immédiatement que le courant d'air l'a transporté de C en D.

Nous aurions pu faire marcher le ballon exactement par le travers du vent. Il aurait décrit le chemin A′D′ (fig. 8 *bis*), qui aurait représenté la composante de ses deux mouvements. Mais, tout comme nous avons pu séparer il y a un instant le mouvement propre du ballon du déplacement de l'air, nous le pourrons encore dans le cas actuel; A′C′, A′B′, sont les *composantes rectangulaires* du mouvement du ballon.

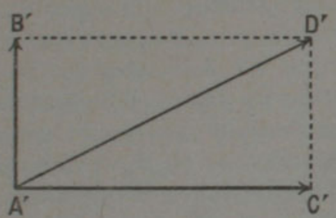


Fig. 8 *bis*. — La décomposition rectangulaire est immédiatement suggérée.

Or remarquons que, au point de vue du résultat, il nous importe peu de savoir comment le ballon s'est transporté de A′ en D′; et, si même il a décrit cette route par ses propres moyens, nous pourrons toujours supposer qu'elle est le fait de deux actions distinctes, produisant des déplacements à angle droit l'un de l'autre.

C'est assurément une fiction, mais une fiction extrêmement utile. Supposons, en effet, que le ballon, au lieu de se mouvoir sur une ligne droite, ait suivi une ligne sinueuse.

Chaque petite portion de cette ligne pourra être remplacée par ses deux composantes, ou, comme on dit, par ses deux projections ; et le mouvement du ballon nous sera entièrement connu si nous décrivons le mouvement de deux points qui se déplacent simultanément le long des droites A′C′ et A′B′, de telle sorte qu'en élevant de ces points des perpendiculaires aux deux axes, on trouve le ballon à leur intersection.

C'est d'une façon semblable que l'on opère lorsqu'on veut mesurer la position d'un bateau cherchant à forcer une passe, afin de le torpiller à coup sûr. Deux postes d'observation, situés sur la côte, suivent à la lunette la marche du bateau ; chacun d'eux détermine l'une des deux projections de son mouvement, et, par un système de signaux convenus, les deux postes se communiquent leurs observations. L'un d'eux, qui a la commande des torpilles dormantes, exactement repérées sur une carte, reporte sur cette même carte la marche du navire, et, lorsqu'il passe au voisinage d'une torpille, ferme le courant électrique qui la fait exploser.

Regardons, à grande distance, une roue tournant dans un plan horizontal et portant un point lumineux : quelque chose comme un soleil pendant le tir d'un feu d'artifice. Nous ne voyons pas autre chose qu'un mouvement de va-et-vient, de droite à gauche, et de gauche à droite, rapide au milieu de sa course et beaucoup plus lent près de ses extrémités ; c'est tout ce que notre observation nous révélera, et nous serons réduits à des conjectures sur le mouvement qu'effectue réellement notre lumière. Si un autre observateur suit ce mouvement d'un point situé également dans le plan de la roue et dans la perpendiculaire à la droite qui nous unit à celle-ci, il percevra exactement les mêmes mouvements, à cela près que, lorsque la lumière sera pour nous au bout de sa course, elle en décrira pour lui le milieu. Il sera tout aussi incapable que nous de définir le mouvement dont il observe l'un des éléments. Mais, si nous connaissons à chaque instant son observation, ou s'il connaît la nôtre, nous pourrons marquer la position du point lumineux, de telle sorte que nous reconstituerons, sans aucune hésitation, la circonférence qu'il décrit.

Nous pouvons mesurer le chemin parcouru en cercle par le point lumineux et calculer sa vitesse ou son accélération. Mais nous pouvons aussi considérer le mouvement de la droite qui le joint au centre du cercle, et qui décrit les angles. Ce mouvement sera connu si nous pouvons indiquer sa *vitesse angulaire*, quantité que l'on exprime par exemple en tours par seconde, ou, plus généralement, par le quotient d'une unité d'angle quelconque par une unité quelconque de mesure du temps.

Retenons une particularité intéressante de notre observation : tandis que notre lumière se meut en cercle avec une vitesse constante, elle semble aller, venir, s'arrêter, repartir. Pour chacun des observateurs, le mouvement apparent est doué d'une accélération, tantôt positive et tantôt négative. Le mouvement uniforme dont la projection possède une vitesse variable est affecté, comme on dit, d'une accélération de direction, dont nous comprendrons bientôt l'importance.

L'analogie entre une oscillation et un mouvement circulaire n'est pas seulement superficielle, comme on pourrait le croire ; elle est profonde, et nous verrons plus tard (§ 38) que la considération de l'oscillation comme projection d'un mouvement circulaire uniforme est très féconde en conséquences.

DEUXIÈME PARTIE

EXPOSÉ DES PRINCIPES

CHAPITRE III

LA FORCE, CAUSE DE L'ACCÉLÉRATION

13. — Vitesse, accélération, force, inertie.

Les adeptes du noble jeu de boules choisissent avec le plus grand soin le terrain de leurs manœuvres. Ils rejettent avec horreur la terre labourée, et sont peu enthousiastes du gravier; ils cherchent un terrain bien plan et régulier : sable ou terre battue. La glace unie d'un lac ne ferait pas leur affaire; car, si même ils ne craignaient pas, en glissant, de s'y rompre les os, ils goûteraient médiocrement le plaisir de courir au loin pour récupérer leurs boules sur cette surface trop roulante.

Suivons la boule depuis le moment où elle est prise en main, jusqu'à celui où elle repose inerte sur le sol. Le joueur la soulève de terre; la poussant en avant par un balancement du bras, il lui donne de la vitesse, puis l'abandonne à son destin; elle ne retombe pas directement sur le sol; elle a acquis la possibilité de tomber obliquement, avant de se mettre à rouler puis de continuer sa route. Sur le terrain classique, elle roule à une distance modérée; en terre labourée, elle se serait arrêtée très vite, peut-être à son premier contact avec le sol, peut-être seulement après un bond ou deux ; dans le gravier, les sauts de côté auraient déjoué toutes les prévisions.

Ainsi, par la volonté du joueur, la boule a quitté le sol, puis elle a pris de la vitesse, qu'elle a ensuite constamment modifiée, ainsi que sa direction : rapidement dans la terre labourée, moins dans le cailloutis, moins encore dans le sable ; et, si le jeu avait été installé sur la glace, elle aurait parcouru un grand espace avant d'atteindre le repos.

Et les mêmes changements lents ou rapides de la vitesse se retrouvent partout. Un projectile quitte l'arme sous la formidable poussée des gaz de la poudre ; s'il est de fort calibre, il pourra s'en aller à dix kilomètres porter la destruction ; mais s'il rencontre alors une cuirasse d'acier, il y pénétrera d'un décimètre à peine.

Les changements de vitesse de la boule ou du projectile ont des causes faciles à découvrir ; ces causes, nous les appelons des *forces*, et nous nous exprimerons dans le langage des mécaniciens en disant que les forces produisent des accélérations : considérables pour de grandes forces (départ et arrêt du projectile dans une cuirasse), faibles lorsque les forces sont peu importantes (trajet du projectile dans l'air, de la boule sur la glace).

Ces changements de la vitesse ne sont jamais rigoureusement nuls, au moins dans les expériences que nous pouvons faire. Cependant ils sont tellement différents, les plus faibles sont si petits par rapport aux plus grands, que nous pouvons souvent les ignorer. Il ne nous faut pas un grand effort pour penser qu'ils n'existent pas du tout : que l'air soit si ténu, la glace si unie, que le projectile ou la boule ne perdent pas leur vitesse. S'ils ne continuent pas leur route indéfiniment en ligne droite, c'est, pensons-nous, qu'il existe toujours des forces infimes entravant leur marche ; supprimons-les par la pensée, et leur course se poursuivra indéfiniment. D'ailleurs, ne sommes-nous pas encouragés à le faire, puisque nous voyons les astres persévérer dans leur course éternelle ?

On nomme *inertie* la propriété de la matière grâce à laquelle elle persiste dans son mouvement rectiligne à vitesse constante lorsque rien ne vient en travers de sa marche. En même temps, nous disons que les forces seules produisent des changements dans les mouvements.

Si nous y regardons de près, nous reconnaîtrons qu'en énonçant successivement ces deux faits (en général les mécaniciens les formulent séparément), nous avons dit deux fois une seule et même chose : si, pour tout changement d'un mouvement il faut une cause, l'absence de toute cause laisse le mouvement inchangé; il n'est donc plus nécessaire d'affirmer que la matière possède une propriété spéciale nommée inertie; il suffit de dire que seules les forces peuvent modifier le mouvement.

Le repos est, pourrait-on dire, un cas particulier du mouvement : c'est le mouvement nul. Si un corps persiste dans le mouvement, il persiste dans le repos en l'absence de toute force.

L'intelligence complète de ces premiers principes est si importante pour toute la suite de nos études, que nous devons, pour ainsi dire, les faire entrer dans notre chair. Cela ne nous sera pas trop difficile lorsque nous aurons résumé en notre esprit quelques-unes des expériences que nous faisons sans cesse.

Lorsque, montant à bicyclette, nous voulons faire un bon départ, nous donnons quelques vigoureux coups de pédale pour mettre notre machine en vitesse; nous sentons qu'elle nous résiste, et qu'il serait inutile de vouloir la lancer brusquement : nous casserions notre chaîne; la vitesse augmente rapidement, mais cependant graduellement, sans brusque variation. Si, alors, nous nous laissons aller en roue libre, notre vitesse se perd peu à peu, rapidement sur mauvaise route, avec vent debout ou dans une côte, lentement sur le bitume bien horizontal et dans l'air calme, ou même pas du tout avec vent dans le dos ou sur une route descendante. Voulons-nous, en terrain plat, reprendre notre vitesse primitive? nous donnons encore quelques bons coups de jarret, après quoi il suffit de nous entretenir par un pédalage modéré.

Un peu de réflexion nous fait comprendre que notre machine est constamment soumise à un ensemble d'efforts, dont les uns nous sont directement révélés par notre sensation musculaire, tandis que l'observation nous fait deviner les autres : frottements dans la machine, contre le sol, action du vent, pesanteur agissant avec ou contre notre effort, etc. Et nous pensons tout naturellement que, lorsque les forces propulsives sont prépondérantes, notre mouvement s'accélère; au contraire, il se ralentit lorsque les forces de freinage, volontaire ou automatique, prennent le dessus; enfin, lorsque les forces propulsives et retardatrices ont la même valeur, notre vitesse reste la même. C'est cette vitesse que nous entretenons en pédalant lorsque nous sommes en régime de marche constante.

Dans tous les autres cas, c'est-à-dire presque toujours, puisque nous ne pouvons jamais dire que notre vitesse est rigoureusement constante, les forces produisent des changements de vitesse, et nous sentons que nous sommes dans le vrai en disant que *les forces sont les causes des accélérations positives ou négatives.*

Assurément, cela n'est pas encore pour nous une certitude mathématique; la question est d'ailleurs si délicate qu'Aristote admettait, avec toute son école, que la force peut, dans certains cas, être employée seulemenl à *entretenir* la vitesse; c'est que le grand philosophe n'avait pas encore su pousser assez loin l'analyse des mouvements, et ignorait l'universalité de l'action des causes antagonistes, c'est-à-dire des frottements. Mais il suffit, pour le moment, que nous ayons le sentiment d'être dans la bonne voie; lorsque nous aurons accumulé les expériences, la foi nous viendra comme elle est venue à ceux qui ont fait, avant nous, des observations complètes relatives aux causes du mouvement.

Nous voyons beaucoup d'objets en repos, et, si notre observation est exacte, nous devons en conclure qu'ils ne sont soumis à aucune force. La vérité est un peu plus compliquée; ils sont tous soumis à des forces, mais les actions de celles-ci sont égales et exactement opposées dans leur ensemble : elles se font équilibre. Puisque les objets en repos sont nombreux, nous pouvons admettre que l'équilibre des forces est fréquent. Cependant, cet équilibre résulte d'actions compliquées, pour la plupart automatiques, et dont la nature ne nous sera connue que lorsque nous en aurons fait une étude minutieuse. C'est pourquoi nous laisserons provisoirement de côté les forces en équilibre, pour nous occuper seulement de celles qui produisent des mouvements. La branche de la mécanique qui étudie ces dernières est la *dynamique*; la *statique*, au contraire, s'occupe des forces en équilibre.

Jusqu'ici, nous n'avons su reconnaître que des relations qualitatives, nous indiquant le sens dans lequel se produisent les phénomènes; pour établir les relations quantitatives, nous donnant les valeurs exactes des effets lorsque nous connaissons celles des causes, nous devrons remplacer la simple observation par l'expérimentation. C'est maintenant dans cette voie que nous allons nous engager.

14. — Étude des lois de la chute.

Au sommet d'un cylindre vertical en carton (fig. 9), recouvert d'une feuille de papier blanc, nous fixons, à un équipage dont l'axe vertical coïncide avec celui du cylindre, un anneau portant, à l'intérieur, un pinceau enduit de couleur et touchant légèrement le cylindre. A l'aide de l'équipage, nous donnons une rapide rotation à l'anneau, puis, en le déclenchant brusquement, nous l'abandonnons à lui-même. Il tombe alors en continuant à tourner autour du cylindre, sur lequel le pinceau trace une spirale enroulée, dont nous étudierons tout à l'heure la forme et les éléments caractéristiques.

Remarquons d'abord que la rotation de l'anneau s'effectue avec une vitesse angulaire constante, ou à peu près, puisque seul le frottement du pinceau sur le cylindre, que nous pouvons considérer comme négligeable, a exercé un effort dans le sens de la rotation.

En revanche, l'anneau a été soumis, en tombant, à une force que nous connaissons, et qui n'est autre que son poids, c'est-à-dire l'effort qu'il exerçait sur l'équipage qui le soutenait, avant d'avoir été abandonné par lui.

Déroulons maintenant le papier pour étudier la spirale

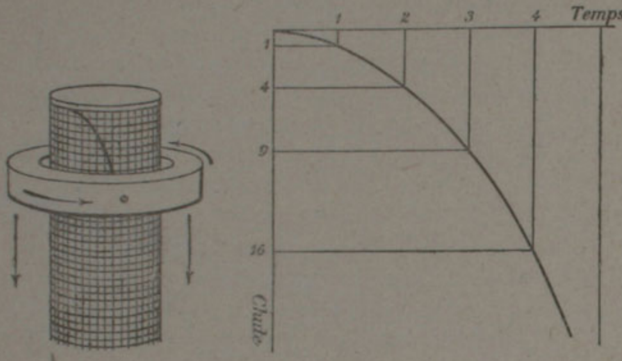


Fig. 9. — Un anneau qui tourne et tombe à la fois trace le diagramme de la chute libre, fig. 10.

que le pinceau y a tracée. Nous voyons qu'elle est constituée par une courbe (fig. 10) qui commence dans la direction horizontale, et s'infléchit de plus en plus vers la verticale.

La vitesse horizontale du pinceau étant constante, les chemins égaux parcourus dans le sens horizontal marquent des temps égaux, que nous désignerons, en unités arbitraires, par 1, 2, 3, 4. Menons, par les points ainsi marqués, des droites verticales. Leurs longueurs, comptées entre le niveau de départ et la courbe, donneront les hauteurs totales de chute de l'anneau depuis l'instant du déclenchement. Les niveaux des points successifs sont de plus en plus distants, ce qui montre que, en des temps égaux, l'anneau a parcouru des espaces verticaux de plus en plus étendus. En d'autres termes, sa vitesse est allée en croissant.

Si nous mesurons les hauteurs totales de chute, et si nous les divisons par la hauteur correspondant au point 1, nous reconnaissons que leurs rapports diffèrent peu de 4, 9, 16, c'est-à-dire de la suite des carrés des nombres entiers.

Nous verrons bientôt que bien des causes auraient pu fausser le résultat de notre expérience. Pour le moment, faisons crédit : supposons que les petits écarts entre les nombres que nous trouvons et les carrés des nombres entiers soient dus à ce qui reste encore de ces causes dans notre expérience. Simplifions conformément au principe précédemment établi, et admettons comme une loi naturelle que, dans la chute d'un corps, les hauteurs parcourues sont entre elles comme les carrés des temps à partir du début de la chute.

Posons donc les nombres suivants :

Durées.	Hauteurs.	Premières différences (vitesses moyennes).	Deuxièmes différences (accélérations moyennes).
0	0		
		1	
1	1		2
		3	
2	4		2
		5	
3	9		2
		7	
4	16		2
		9	
5	25		

Les différences entre les chemins parcourus dans des durées successives égales sont proportionnelles aux vitesses moyennes pendant ces intervalles. Ces vitesses sont exprimées par la série des nombres impairs.

Les différences de ces vitesses moyennes sont toutes égales au nombre 2; nous pouvons donc dire que l'*accélération moyenne* est constante.

15. — Déduction des lois de la chute. Symboles.

Puisque l'accélération moyenne est constante, il n'y a aucune témérité à dire que l'accélération dans la chute libre est toujours la même. Et, en partant de cette idée, nous pouvons, par la méthode intuitive, retrouver la loi de la chute des corps comme une nécessité.

Aidons-nous d'une représentation géométrique. Portons (fig. 11) sur une ligne horizontale (en abscisses), des longueurs proportionnelles au temps, et, dans le sens vertical, figurons l'accélération. Comme elle est la même à tout

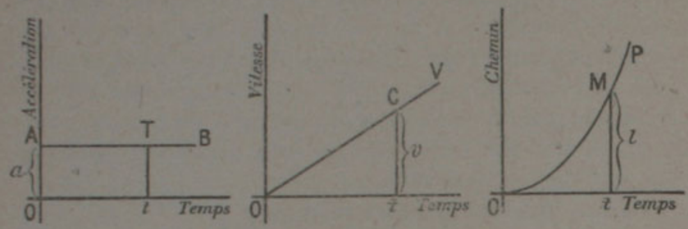


Fig. 11. — Accélération, vitesse, déplacement.

moment, elle sera donnée par la droite AB parallèle à l'axe des temps.

Mais l'accélération est la variation de vitesse dans un temps donné ou le quotient de la différence des vitesses par le temps dans lequel elle s'est produite; la vitesse est, réciproquement, le produit de l'accélération par le temps. Depuis le premier moment jusqu'à l'instant t, l'accélération a donc engendré une vitesse qui est figurée par le produit de l'accélération a par le temps t : c'est la surface du rectangle OATt.

Cette surface est proportionnelle à l'éloignement de l'origine; si nous l'exprimons numériquement, nous pouvons la représenter, comme nous l'avons fait dans le deuxième diagramme, par la droite OV, le temps étant encore l'abscisse et la vitesse l'ordonnée.

Quant au chemin parcouru, il est égal au produit de chacune des vitesses par le temps pendant lequel elle a duré. Dans le cas actuel, on peut dire que chaque vitesse ne dure pas, puisque la vitesse change constamment. Mais, en découpant le temps en tranches imperceptibles, on pourra multiplier les vitesses par le temps; le produit total sera donné par la surface du triangle OCt, qui est égale à $\frac{vt}{2}$: et, comme $v = at$, cette surface (c'est-à-dire le chemin parcouru) est donnée par $\frac{at^2}{2}$. Nous représentons le chemin par la courbe OP, qui est une parabole.

Dans le cas particulier de la chute des corps, on a coutume de désigner l'accélération par g. On écrira donc les trois lois de la chute libre sous la forme suivante :

Accélération constante : g
Vitesse proportionnelle au temps : $v = gt$
Chute proportionnelle au carré du temps : $l = \frac{gt^2}{2}$.

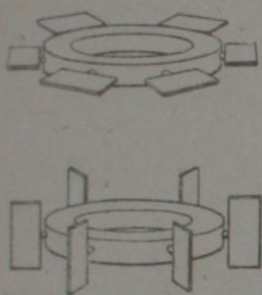
Pour découvrir les lois de la chute, nous nous sommes servi d'une série de symboles; nous nous sommes fait une représentation du temps formant une image dans notre esprit; nous l'avons figuré par des longueurs qui lui étaient proportionnelles. Un semblable procédé de représentation n'a rien qui ne nous soit très habituel. L'aiguille d'une montre nous indique l'heure par son déplacement : l'angle qu'elle décrit mesure le temps, dont la rotation de la terre nous donne l'unité.

Nous pouvons tout aussi bien, pour créer un symbole, assimiler une accélération ou une vitesse à une longueur. Et enfin, dans le troisième diagramme, nous retrouvons une longueur qui est l'image d'une autre longueur : c'est également son droit. Nous avons seulement représenté une longueur relativement grande par une toute petite. C'est le procédé employé pour établir les cartes géographiques.

Nous aurions pu dessiner plus directement notre parabole; bien plus, elle se dessine d'elle-même constamment en des milliers et des millions d'endroits. Un jet d'eau partant dans une direction horizontale tombe suivant une parabole. Le déplacement horizontal des particules d'eau est proportionnel au temps; leur mouvement vertical marque leur hauteur de chute, et la combinaison de ces deux mouvements a le même sens que celui de notre pinceau.

16. — Exagération des causes perturbatrices, leur étude et leur élimination.

Il est utile que, dès cette première expérience, nous nous rendions compte de la nature et de la grandeur des



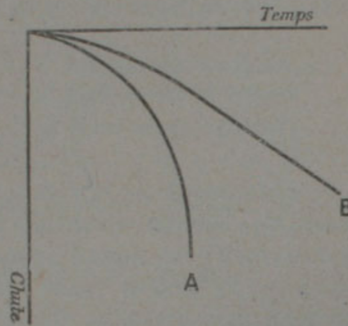


Fig. 12 et 13. — En exagérant l'action de l'air, on déforme les lois de la chute.

erreurs qui ont pu fausser notre résultat, et nous ont obligés d'user de notre procédé de simplification. Remplaçons donc notre anneau lourd par un anneau plus léger, en bois, muni à sa périphérie d'une couronne de goujons portant chacun deux fentes en croix, horizontales et verticales. Engageons, dans les fentes verticales, des cartes qui donneront à l'anneau l'aspect d'un moulinet (fig. 12), et provoquons sa chute après que nous lui aurons imprimé un mouvement de rotation. Puis recommençons encore l'expérience, mais après avoir engagé les cartes dans les fentes horizontales. Le papier étant développé, nous voyons (fig. 13) que les deux courbes tracées diffèrent beaucoup l'une de l'autre, et s'écartent de la parabole primitive dans les deux sens. La première, OA, tombe beaucoup plus rapidement, finissant par une chute à peu près verticale; la seconde, OB, aboutit à une droite oblique, qui représente la chute effectuée à vitesse constante.

Analysons maintenant notre expérience. Dans la première de nos deux chutes, notre anneau était équipé de telle sorte que l'air opposait une résistance notable à son mouvement de rotation. Ce mouvement, au lieu de s'effectuer, comme auparavant, avec une vitesse constante, s'est ralenti peu à peu, et a fini par s'arrêter presque complètement.

Dans la dernière chute, la vitesse de rotation s'est conservée sensiblement; et, comme les chemins parcourus dans le sens vertical sont, au bout d'un instant, égaux dans des temps égaux, la chute, après s'être accélérée, s'est terminée avec une vitesse constante. Conformément aux principes exposés précédemment, pendant la dernière partie de la chute, l'ensemble des forces agissant sur l'anneau était en équilibre.

Dans la précédente expérience, nous avions rendu négligeable l'action de l'air par rapport aux autres forces agissant sur l'anneau. Dans les deux expériences actuelles, nous avons, au contraire, exagéré artificiellement cette action, soit dans le sens de la chute, soit dans le sens de la rotation, ce qui a eu pour résultat de donner aux lois de la chute un aspect tout nouveau. Dans la première de nos deux expériences, la rotation de l'anneau ne peut plus être prise pour la mesure du temps; dans la seconde, la chute arrive à se produire avec une vitesse constante, et non plus avec une accélération constante, comme précédemment.

Nous pouvons nous faire encore une idée des deux modes de chute que nous venons d'expérimenter, en les rapprochant d'objets familiers. Le premier est celui d'un ballon de football, qui, lancé horizontalement, retombe à peu près en chute verticale. Le second est celui d'un aéroplane dont on a coupé l'allumage, et qui atterrit en glissant sur l'air sous un angle constant.

Dans les deux cas, l'air, si faible que soit sa densité, a joué un rôle tellement prépondérant dans la chute, qu'il en a dénaturé complètement l'aspect.

Telle est la complication des lois de la chute dans l'air, lorsqu'on ne sait pas éliminer son influence (en majorité par une expérience organisée pour la réduire autant que possible, pour le reste par une opération de l'esprit), que leur découverte est une conquête des temps modernes. Aristote et ses continuateurs avaient toujours envisagé le problème avec toute sa complication ; ils avaient découvert qu'au début de la chute, le mouvement d'un corps s'accélère, mais ils admettaient qu'après un certain temps la vitesse devient constante, et ils en avaient tiré, comme nous l'avons vu, une conclusion générale erronée, qui s'est conservée pendant plus d'un millénaire.

Galilée le premier sut isoler, dans la chute, ce qui est essentiel (l'action du poids du corps) de ce qui est accidentel (la résistance de l'air). Et, grâce à cette vue de son esprit, il fonda la dynamique.

La diffusion des armes à feu, au début des temps modernes, aida puissamment à la découverte des lois fondamentales de la mécanique, en posant les problèmes du mouvement sous une forme toute nouvelle; cependant, il fallut encore près de deux siècles pour qu'elles fussent parfaitement comprises. Léonard de Vinci (1452-1519), il est vrai, qui fut en même temps l'un des plus grand artistes et le plus grand mécanicien de son époque, avait deviné les lois de la chute, mais ne les avait pas publiées. Santbach enseignait, en 1561, qu'un projectile part en ligne droite, puis tombe verticalement lorsque sa vitesse est épuisée. Et son opinion pouvait paraître si peu absurde au vulgaire qu'elle a été reprise, il y a moins de dix ans, par un journaliste qui voulait expliquer comment l'hercule Tom Canon parvenait à retenir un projectile lancé par une bouche à feu. Tout l'art du vigoureux Tom devait consister à avoir su déterminer le point précis où le projectile s'arrêtait un instant très court avant de commencer à tomber!

Ne voit-on pas, d'ailleurs, la fumée du canon, qui sort de la bouche à feu dernière le projectile et avec la même vitesse, s'arrêter dans l'air sur un espace de quelques mètres? La différence entre les particules de fumée et le projectile véritable est que celui-ci est gros, tandis que les premières sont extrêmement petites. Nous verrons plus tard ce qui, au point de vue de la conservation de la vitesse, les différencie profondément.

Dans la science, le progrès est lent, et il est nécessaire que le savant le plus perspicace aide, par tous les moyens dont il dispose, son intelligence à se débarrasser des apparences. L'étude de la chute des corps nous en offre un exemple très frappant. Ses lois ne parurent incontestables que lorsqu'on eut, grâce à l'invention de la machine pneumatique par Otto de Guericke, montré qu'une plume et une balle de plomb tombent avec la même accélération lorsque l'action de l'air est supprimée. Dans l'air, l'action de la pesanteur est prépondérante pour la dernière, tandis que, pour la première, l'action de l'air est si efficace que le moindre courant ascendant la fait remonter.

On sait que les poussières rejetées par le Krakatoa ou par la Montagne Pelée se sont répandues dans l'atmosphère entière, et que, pendant plus d'une année après les terribles éruptions de ces volcans, des lueurs particulières, observées surtout au soleil couchant, ont permis de constater leur présence ; si la terre était un astre dépourvu d'atmosphère comme la lune, il eût suffi de quelques minutes pour que toute cette poussière retombât sur le sol.

A dimensions égales, les poussières tombent beaucoup plus lentement dans l'eau que dans l'air. Si nous produisions, dans un bocal, un nuage de potée d'émeri, nous le verrions immédiatement se rassembler au fond. Mais, lorsqu'on débat la même poudre dans de l'eau, elle retombe peu à peu, en strates étagées de grains de grosseur décroissante. Ce phénomène est si constant qu'il fournit le meilleur procédé de séparation des poudres à polir.

Les deltas des fleuves se forment par le dépôt immédiat des gros grains de sable et de limon. Les poussières plus fines restent plus longtemps en suspension ; et, à mesure qu'elles diminuent de grosseur, elles donnent à l'eau, par réflexion de la lumière, les colorations successivement verte, bleue et violette.

De tels exemples nous montrent que l'accidentel dans un ensemble peut masquer le phénomène principal. Et cette remarque nous aide à comprendre comment il se fait que de longs siècles d'observations n'aient pas pu dégager les lois les plus élémentaires.

Suivant les conditions particulières de notre habitat, les lois naturelles auraient pris tel ou tel aspect. Nous venons de voir quelles difficultés entourent, dans l'air ténu où nous vivons, la découverte des lois les plus simples. A coup sûr, les oiseaux ne les auraient pas trouvées, et il en serait de même pour nous, si nous vivions dans l'eau, dans la glycérine, ou plus encore dans la mélasse. Mais revenons aux choses simples.

17. — Généralisation des lois de la chute.

Les résultats que nous venons de découvrir seraient déjà fort intéressants, même s'ils étaient isolés. Mais nous allons pouvoir les généraliser, et leur donner ainsi une portée immensément plus vaste.

Les forces engendrent les accélérations; l'accélération produite par la pesanteur est constante; tels sont les points déjà acquis; une brève investigation complémentaire nous en montrera l'importance et la fécondité.

L'effort que nous faisons pour soutenir un poids nous donne une idée *qualitative* de la pesanteur : mais nous avons vu combien nos sens sont trompeurs, avec quel soin nous devons contrôler leurs témoignages, et combien souvent la mesure doit être substituée à la simple observation.

Fixons, à une charpente en bois [1], un ressort à boudin supportant un plateau dans lequel nous mettrons un poids de 100 grammes; le ressort s'allongera, et, si nous l'avons muni d'une aiguille, nous pourrons lire son extension sur une échelle. Ajoutons 10 grammes, l'aiguille descendra; retirons-les, elle remontera jusqu'à sa première position. Nous n'avons aucun doute sur la cause de la déformation du ressort, et nous avons le sentiment que

1. Voir l'appareil de la figure 45, dans lequel le fil est remplacé par un ressort.

son allongement *mesure*, pour ainsi dire, la valeur de la charge qu'il supporte.

Plaçons maintenant notre appareil sur le plancher, puis sur une table, puis transportons-le à l'étage supérieur de la maison ou même jusqu'au grenier; notre aiguille pointera toujours sur la même division, alors qu'une petite surcharge du plateau avait augmenté bien visiblement l'extension du ressort. Nous en concluons que, dans les limites de nos déplacements et de la sensibilité de nos mesures, au moins aussi précises que nos précédentes expériences sur la chute de l'anneau, l'effort exercé par notre poids sur son support est le même; notre anneau possédait donc, dans toute l'étendue de sa chute, le même poids, c'est-à-dire qu'il exerçait sur lui-même un effort constant. Nous pouvons donc donner, à notre premier résultat, une forme beaucoup plus générale qui est la suivante :

Un corps sollicité par une force constante possède une accélération constante et une vitesse proportionnelle à la durée de l'effort; il décrit un chemin qui, compté à partir du repos, est proportionnel au carré de la durée de l'effort.

Retenons bien cette loi, elle est fondamentale.

Il n'était certainement pas inutile de faire, au moyen du ressort, une espèce de sondage du *champ de force* dans lequel nous opérons. Si, en effet, notre plateau avait porté un morceau de fer, et si nous avions réalisé notre expérience au voisinage d'un aimant puissant, nous n'aurions trouvé ni la constance de la force, ni la constance de l'accélération. L'aimant eût réalisé une cause accidentelle de complication de notre première expérience, dont il aurait fallu d'abord nous débarrasser. Mais, heureusement pour la découverte des lois de la chute, les aimants puissants sont rares et d'invention moderne; puis tous les corps ne possèdent pas les propriétés du fer. Si les aimants étaient depuis longtemps très répandus, et si beaucoup de corps étaient fortement magnétiques, les lois fondamentales de la mécanique nous seraient peut-être encore inconnues.

CHAPITRE IV

LE TRAVAIL DES FORCES

18. — La genèse du travail.

Qu'est-ce, dans le domaine du labeur manuel, qu'un travailleur? C'est un homme qui fait un effort utile en remuant ses bras. Si nous voyions, en effet, un menuisier pousser son rabot contre une planche et rester ainsi longtemps immobile, nous dirions qu'il est peu travailleur; nous ne lui demandons pas de buter sa planche contre le valet de son établi, mais de la planer, en promenant le rabot à sa surface; c'est en faisant de façon intelligente ce mouvement et d'autres analogues qu'il gagne sa vie. Et quel que soit l'artisan au travail, mécanicien, laboureur, terrassier, nous voyons que toujours il fait effort et soutient son effort le long d'un certain chemin.

Nous obtenons gratuitement l'effort immobile; c'est celui de la table supportant nos livres; nous payons, au contraire, l'effort qui se déplace, et nous lui attribuons ainsi une valeur sociale particulière, que nous échangeons contre une autre valeur. Il n'y a point là d'exception dans le fait que l'effort immobile est parfois coûteux; si un cheval arrêté dans une pente se fatigue en retenant le tombereau auquel il est attelé, c'est que le charretier a négligé de serrer le frein ou de caler la roue. Une semblable économie peut toujours être réalisée.

On apprécie plus le travail de l'orfèvre que celui du terrassier, et tandis qu'on applaudit le cheval de course, on se soucie peu du travail qu'accomplit patiemment le cheval de tombereau. Nous attribuons ainsi, à tort ou à raison, un certain degré de *qualité* au travail, et nous le taxons en raison de cette appréciation. Mais la mécanique ne saurait entrer dans ces subtiles distinctions ; elle ne peut mesurer que la *quantité* du travail, et, pour y parvenir, elle doit en donner d'abord une définition précise.

On aura une bonne définition si elle correspond à ce que le bon sens nous enseigne. Or, si nous voyons un cheval remonter le long d'une pente, deux fois plus loin qu'un autre, un tombereau également chargé, nous dirons qu'il a produit deux fois plus de travail; de même si, attelé à un tombereau deux fois plus lourd il fait le même chemin, son travail est encore double. Nous aurons donc une bonne définition du travail en disant qu'il est proportionnel à l'effort et au chemin parcouru. C'est, en effet, cette définition que la mécanique a résumée, en disant que *le travail effectué par une force est égal au produit de cette force par son déplacement* [1].

19. — Absorption et restitution du travail.

Le déplacement d'un effort peut avoir bien des effets divers. L'élévation d'un fardeau en est un, dont l'évaluation est particulièrement simple; il en est de nature plus compliquée, comme ceux qui consistent à enlever des copeaux ou à faire de la limaille, à briser et pulvériser un corps, et des milliers d'autres que nous découvrons aisément en regardant autour de nous. Mais l'effet du travail peut être aussi de donner de la vitesse à un mobile, véhicule ou projectile. L'effort de la main sur la pierre lancée, de la corde de l'arc sur la flèche, des gaz de la

1. Nous reviendrons, au début de la troisième partie, sur le sens vrai qu'il faut attribuer à cette notion du produit d'une force par une longueur, ou, généralement, du produit ou du quotient de deux quantités concrètes.

poudre sur l'obus ou la balle a pour effet de communiquer à ces divers objets de la vitesse qui leur permet ensuite, grâce à leur inertie, de se déplacer d'eux-mêmes.

Or un objet lancé ne marche pas indéfiniment; les forces qui agissent sur lui modifient sa route, mais la matière qui est le support de ces forces en subit aussi les effets. Lorsqu'un blindage arrête un obus, celui-ci s'y engage fortement et en refoule le métal; il a pu, ainsi, en un temps infime, produire un travail qu'une machine aurait accompli en un temps beaucoup plus long.

L'eau qui prend de la vitesse au flanc d'une montagne peut tomber sur une roue à aubes et produire un travail utile aux hommes; elle quitte la roue avec une vitesse inférieure à celle qu'elle possédait en l'abordant; c'est là le prix du travail qu'on lui demande.

Un corps qui a emmagasiné du travail est un objet nouveau : la balle, inoffensive au repos, devient meurtrière lorsqu'elle est lancée; c'est le travail qu'elle a absorbé, et qu'elle est prête à restituer, qui est sa véritable raison d'être.

Souvent, en effet, le travail emmagasiné dans un objet vaut plus que l'objet lui-même. A moins de l'admirer pour sa beauté, ce que nous apprécions dans une chute d'eau c'est le travail qu'elle peut fournir, et non point l'eau elle-même, puisque nous la recueillons avec soin aussi longtemps que nous pouvons lui soutirer sa vitesse, alors que nous ne cherchons qu'à nous en débarrasser comme d'un déchet dès qu'elle l'a perdue.

Ainsi, l'une des propriétés essentielles de la matière est de constituer le véhicule du travail. Elle l'emmagasine et le restitue tour à tour. La pierre lancée, l'obus projeté par les gaz de la poudre, le train qui, aiguillé sur une voie de garage, bouscule les butoirs, produisent en effets destructeurs l'équivalent du travail qu'ils ont absorbé. Le corps pesant, qui a augmenté sa vitesse dans la chute, peut, à son tour, produire un travail utile ou destructeur, peu lui importe, et peu importe à la mécanique. La valeur marchande du travail n'a de signification que pour nous, encore les opinions peuvent-elles différer; pour celui qui le lance, l'obus produit un travail utile; il est nuisible à celui qui en subit les effets; s'il a une valeur positive pour l'un, elle est négative pour l'autre. Mais, pour le mécanicien indifférent et qui n'envisage que le phénomène en lui-même sans se préoccuper de ses contingences, la valeur de ce travail est toujours la même.

Parmi les travaux en grand nombre que peut effectuer un corps en échange de sa vitesse, il en est un dont la relation avec le travail emmagasiné est particulièrement simple : c'est celui de la remontée d'un corps qui a pris sa vitesse par une chute.

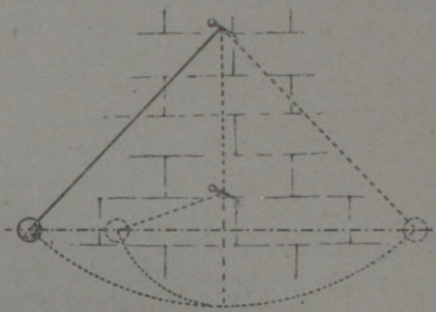


Fig. 14. — La masse d'un pendule remonte sensiblement au niveau de son point de départ.

Un cycliste descendant une pente sans freiner est capable de remonter en roue libre le long de la côte qui lui fait suite. Nous savons qu'il remonte moins haut que n'était son point de départ, et que, pour atteindre au même niveau, il est obligé de pédaler; mais nous savons également qu'une partie du travail de descente a disparu dans les frottements, dont l'évaluation est difficile, et nous ne pouvons encore rien en conclure.

Pour mieux fixer nos idées, nous pouvons instituer une expérience beaucoup plus simple, dans laquelle nous réduirons autant que possible les pertes de travail.

Suspendons (fig. 14) une boule de métal à un fil très souple, attaché à un support rigide, et écartons-la de sa position de repos, puis abandonnons-la à l'action de la pesanteur. Tant qu'elle descendra, sa vitesse ira en croissant. Au moment du passage par la position de repos, la vitesse atteindra sa plus grande valeur, puis commencera à diminuer dès que la boule s'engagera dans la remontée.

Lorsque la boule aura perdu toute sa vitesse, et sera prête à redescendre, nous verrons facilement qu'elle a atteint sensiblement le niveau d'où elle était partie.

Nous pouvons modifier très utilement cette expérience en plantant, dans la muraille, un clou placé exactement au-dessous du point de suspension du fil. La boule montera comme dans le premier cas, mais cette fois sur un arc de cercle d'un plus petit rayon. Nous constaterons encore qu'elle est arrivée très près de son niveau de départ. Enfin, si nous abaissons suffisamment le clou, nous pouvons donner à l'arc de cercle un rayon assez petit pour que la boule fasse un tour complet en décrivant une circonférence autour du point d'arrêt, comme dans le *Looping the loop*.

La série des expériences que nous venons de décrire est due à Galilée. Elles constituent, encore de nos jours, la démonstration la plus simple et la plus directe du fait qu'un corps ayant absorbé, dans la chute, une quantité de travail qui lui a donné une certaine vitesse, est susceptible de remonter au niveau de départ si aucune cause extérieure ne consomme, sur son trajet, le travail effectué par les forces qui agissent sur lui.

Dans le va-et-vient de la boule, la pesanteur effectue alternativement un travail d'accélération et un travail de ralentissement. Ces deux formes du travail s'échangent périodiquement, et nous voyons, à des intervalles égaux, le travail se transformer en vitesse de la boule, et la vitesse se changer inversement en travail. Et l'égalité de hauteur à laquelle la sphère arrive sensiblement dans les oscillations successives nous montre que, lorsqu'aucune portion du tra-travail n'est détruite, sa valeur se retrouve en entier dans la vitesse du mobile qui l'a absorbé, et qui est prêt à le rendre.

Nous reprendrons bientôt l'étude du travail; mais, auparavant, et pour rendre cette étude plus fructueuse, nous allons chercher à connaître les propriétés de la matière qui l'absorbe ou le restitue.

20. — La masse.

Les corps sont, nous venons de le voir, les véhicules du travail : ils l'emmagasinent en augmentant leur vitesse, et le restituent en la perdant. Or tout ce qui peut absorber et rendre (un seau vide, une éponge, un réservoir), est ce qu'on nomme une *capacité*; nous nous entendrons très bien, par conséquent, si nous disons que *les corps possèdent une capacité d'absorption du travail.*

Mais il est essentiel de connaître celle des propriétés de la matière qui lui vaut sa capacité d'absorption. Nous savons déjà que son état, solide, liquide ou gazeux, n'est pas un facteur essentiel de cette capacité, puisque, si les solides lancés produisent du travail, une chute d'eau et le vent lui-même en engendrent aussi.

Il est évident que la *quantité* de la matière engagée dans une opération mécanique est un facteur très important de sa capacité d'absorption du travail ; plus un obus est gros, plus il produit de dégâts à vitesse égale ; et plus il passe d'eau dans une turbine, plus elle fournit de travail utile. Ce dernier exemple nous fait entrevoir, presque comme une évidence, que le travail restitué par la vitesse est proportionnel à la quantité de la *même* matière engagée ; et, aussi longtemps qu'il s'agit d'une matière unique, ce mot de quantité n'a pas besoin d'être autrement défini. Mais, si nous passons d'un corps à un autre, la notion de quantité peut prendre bien des sens différents ; et il est d'autant plus nécessaire d'éclairer parfaitement notre intelligence sur ce point, que nous touchons ici à l'une des notions les plus importantes et les plus délicates de la mécanique.

Les corps qui nous entourent possèdent des propriétés en grand nombre, qui nous permettent de les distinguer, et leur assignent leur utilité ou leur valeur conventionnelle.

La fortune d'un homme est la quantité de valeurs qu'il possède ; ces valeurs peuvent être des terres, des immeubles, des propriétés industrielles, des titres de rente, des brevets d'invention ou des droits d'auteur. Deux fortunes numériquement égales peuvent être représentées par des objets très divers, et un bon papier signé de Rockefeller peut valoir un transatlantique ou mille hectares de forêts.

Pour un financier, le papier et le navire ou quelques gros diamants peuvent avoir une valeur égale, et représenter la même *quantité* dans le domaine dont son esprit est préoccupé. N'est-ce point dans ce sens que le bon abbé Jérôme Coignard entendait le mot quantité? lorsque, jetant une bouteille à la tête d'un fermier général, il lui disait : « Va-t'-en, homme de quantité! »

Mais nous savons que ce n'est pas dans ce sens que la mécanique entend le mot quantité. Un morceau de papier possède une bien petite capacité d'absorption de l'énergie, et cette capacité est la même, pour un même papier timbré, que celui-ci porte la signature de M. de Rothschild ou celle de ce fils de famille disant, après avoir signé : « Tout à l'heure il valait encore soixante centimes, maintenant il ne vaut plus rien du tout ».

Pour un emballeur, la quantité de matière est surtout son volume ; c'est ce qui produit pour lui l'encombrement, et fixe la grandeur des caisses qui doivent la contenir. Mais ce n'est pas là encore qu'est la caractéristique de la quantité en mécanique. Prenons en effet une pierre ponce et un silex de même volume, et jetons-les; le dernier opposera à notre main une résistance plus grande que la première, et ensuite il enfoncera sans hésiter une vitre contre laquelle la pierre ponce aura rebondi.

Le volume, c'est-à-dire la capacité d'absorption de l'espace, n'a donc rien de commun avec la capacité d'absorption du travail.

Nous ne serions pas plus heureux en étudiant la capacité d'absorption de la chaleur. Nous pourrions même essayer tout au monde, et nous trouverions que les corps se rangent, au point de vue de leurs diverses capacités d'absorption, dans des ordres quelconques, sans qu'il se dégage, de la comparaison des diverses séries, autre chose que des relations compliquées.

Si nous voulons voir plus clair dans cette difficile question, il faut procéder par une expérience directe.

Nous avons suffisamment éclairci la notion de travail pour savoir qu'en faisant tomber un même corps, nous pouvons obtenir des quantités de travail proportionnelles

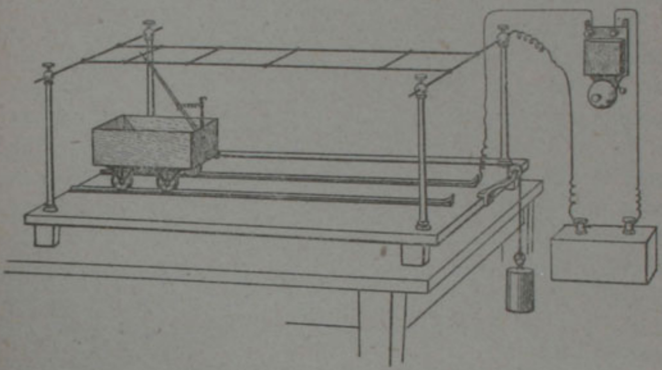


Fig. 15. — En absorbant du travail, la matière acquiert de la vitesse.

aux hauteurs de chute. C'est donc ainsi que nous produirons le travail; il nous reste à l'absorber.

Posons, sur une planche bien plane et horizontale (fig. 15), un petit chariot attelé à une corde sur laquelle tire le poids, après qu'elle a passé sur une poulie légère. Le chariot portera une tige flexible, comme la perche d'un tramway, qui servira à prendre contact, sur son passage, avec des fils formant comme des ponts au-dessus de la voie, et, à chaque contact, fermant un circuit électrique, nous entendrons un coup de timbre. Notre expérience devra consister à faire coïncider ces coups avec ceux d'un métronome, ce que nous réaliserons en plaçant convenablement les ponts.

Nous mettons d'abord le métronome en marche, et, au moment précis où il frappe, nous abandonnons le chariot. Après quelques tâtonnements, nos ponts sont placés; et, si nous mesurons leurs distances, nous voyons que leurs rapports diffèrent peu des nombres 1, 4, 9, c'est-à-dire de la suite des carrés des nombres entiers.

Nous saluons ici avec plaisir un ancien ami; le résultat est, en effet, semblable à celui de notre première expérience sur la chute des corps; il vérifie *a posteriori* l'énoncé que nous avions donné des lois du mouvement pour un corps actionné par une force constante.

Nous pouvons maintenant mettre une pierre dans le chariot, et recommencer l'expérience. Les coups du timbre seront en retard sur ceux du métronome, ce qui ne nous surprendra pas, puisque l'ensemble de notre chariot et de sa charge possède une capacité d'absorption plus grande que le chariot seul. Mais nous pouvons rétablir la coïncidence en élevant la masse du métronome. Nous pouvons alors chercher les quantités de diverses matières : plomb, sable, eau, mercure, qui possèdent la même capacité d'absorption que la pierre, ce que nous reconnaîtrons par la coïncidence des coups du timbre et du métronome.

L'aspect des quantités égales de matière, dans le sens que nous cherchons, devra nécessairement nous frapper, et nous suggérera un rapprochement.

Dans la vie quotidienne, on détermine de façon très simple les quantités de matière en les comparant, sur une balance, à des poids marqués, qui servent de repères pour ces quantités dans le sens mercantile ou conventionnel. Notre premier soin devra donc être de comparer sur la balance les quantités de matière que nous avons reconnues égales. Et voici qu'après tant d'expériences décevantes, nous trouvons enfin la coïncidence cherchée : la balance nous dit que ces quantités, égales entre elles dans notre expérience dynamique, c'est-à-dire capables d'absorber le même travail en prenant la même vitesse, sont aussi égales en poids.

Notre détermination dynamique de la quantité de matière manquait certainement de précision; mais il nous suffira de savoir que des mesures extrêmement précises, faites par des procédés délicats, et dont nous ne comprendrions pas encore la théorie, ont conduit exactement au même résultat : *la capacité d'absorption du travail est, pour tous les corps, proportionnelle à leur poids.* Cette relation, à la vérification de laquelle Newton, puis Bessel, ont consacré de patientes recherches, est l'une des plus importantes et des plus mystérieuses de celles qui régissent notre univers; elle nous permet de pénétrer très profondément dans la constitution de la matière, et nous donne le meilleur argument en faveur de son unité.

Pour abréger le langage, nous remplacerons cette expression un peu longue de *capacité d'absorption du travail* par le mot *masse*; et nous énoncerons la loi que nous venons d'établir, en disant que, pour tous les corps, les *poids* et les *masses* sont des quantités proportionnelles.

Au lieu d'atteler notre poids moteur à un chariot, nous aurions pu employer le travail qu'il produit à se donner à lui-même et à lui seul une accélération; nous aurions dû trouver alors, en opérant ainsi sur des substances diverses, que tous les corps tombent, à la surface de la terre, *avec une même accélération.*

Nous avons vu déjà pourquoi la découverte de cette loi a présenté de grosses difficultés : les apparences lui sont contraires, et il faut savoir la discerner avec les yeux de l'esprit. La voie par laquelle nous venons de la découvrir nous en a fait comprendre non seulement l'existence, mais, ce qui vaut encore mieux, le sens profond.

Les termes « poids » et « masse » sont souvent confondus dans le langage vulgaire; pour réagir contre cette négligence dans l'emploi des mots, on affirme souvent que la *masse* est la *quantité de matière* d'un corps; il y a un progrès certain sur l'emploi erroné du mot poids; mais nous venons de voir combien le mot « quantité » est vague; combien, lorsqu'on veut en extraire le sens, il fuit devant notre pensée. Nous avons maintenant le sentiment très net de ce qu'est la capacité d'absorption du travail; l'abréger en le remplaçant par le mot « masse » est une économie bien comprise; mais, lorsque nous nous en servirons, nous ne devrons jamais oublier la genèse de la notion qu'il définit.

21. — L'énergie cinétique.

L'étude du mouvement de notre chariot nous a déjà appris bien des choses, mais il nous manque encore un renseignement : nous ne savons pas comment la vitesse et la masse s'échangent dans l'expression d'une même quantité de travail absorbé. L'expérience va nous répondre.

Chargeons notre chariot progressivement, jusqu'à ce qu'il emploie un temps double pour passer d'un pont à l'autre, ce que nous reconnaîtrons par le fait que le timbre ne sonnera qu'une fois pour deux coups du métronome; l'accélération sera moitié moindre, tandis que le travail absorbé sera le même pour une même chute.

Il nous reste maintenant à établir le rapport des masses en jeu dans les deux expériences. Or nous savons qu'il nous suffit de les peser; et, comme le travail est absorbé à la fois par le poids moteur, le chariot et sa charge, nous pèserons tout cet ensemble.

Le résultat est très simple, car la balance nous révèle que, dans le second cas, la masse en jeu est quatre fois plus grande que dans le premier.

Si nous voulons revenir à notre première accélération, nous devrons partager la charge entre le chariot et le poids moteur de telle sorte que celui-ci soit quadruple de ce qu'il était dans la première expérience; en le quadruplant encore, nous trouverons une accélération double, c'est-à-dire que nous entendrons deux coups du timbre pour un du métronome; et toutes ces expériences réunies nous conduiront aux énoncés suivants :

1° A une masse quadruple correspond, pour un même travail absorbé, une vitesse deux fois moindre;

2° A un travail quadruple correspond, pour une masse quadruple, la même vitesse;

3° A un travail quadruple correspond, pour une même masse, une vitesse double.

Ces diverses relations sont synthétisées dans celle que voici : Le travail absorbé par une masse m, ayant pris une vitesse v est proportionnel à mv^2.

Mais nous ne pouvons pas nous contenter d'une proportionnalité; nous avons besoin d'une égalité.

Les expériences qui précèdent nous ont montré que, pour une masse quadruple entraînée par le même effort, une vitesse deux fois moindre est atteinte en un temps deux fois plus long; l'accélération est donc quatre fois moindre; il en résulte :

$$\text{accélération} = \frac{\text{force}}{\text{masse}}.$$

Or, lorsqu'un corps tombe en chute libre, la force qui l'entraîne est égale à son poids; donc

$$\text{Accélération } g = \frac{\text{poids}}{\text{masse}} = \frac{p}{m}$$

d'où

$$p = mg.$$

D'autre part, nous avions trouvé, par l'étude de la chute libre :

$$l = \frac{gt^2}{2}.$$

Multipliant les deux dernières équations membre à membre, on trouve :

$$pl \text{ (travail de la chute)} = m\frac{g^2t^2}{2}.$$

D'après la deuxième loi de la chute, nous pouvons remplacer gt par v, ce qui donne finalement :

$$\text{Travail} = \frac{mv^2}{2}.$$

Cette relation est fondamentale en mécanique. Nous apprendrons tout à l'heure à nommer la quantité inscrite au second membre de l'équation; mais auparavant, il est utile que nous revenions en arrière, et que nous repassions par le chemin qui nous a conduits à cette relation.

Nous avons fait absorber du travail par des matières quelconques, et nous avons établi ainsi l'égalité de capacité d'absorption pour diverses substances; puis nous avons recherché quelles étaient les relations entre la quantité de matière, le travail absorbé et la vitesse acquise par la matière. Chemin faisant, nous avions cherché les relations pouvant exister entre les mêmes quantités de diverses substances, le mot quantité étant pris dans les sens les plus variés; et nous avions trouvé une seule coïncidence, très remarquable et très précise : nous avions reconnu que les capacités d'absorption sont porportionnelles aux poids; et, comme nous avions désigné sous le nom de *masse* la capacité d'un corps pour le travail, nous étions arrivés à cette relation fondamentale : les poids des corps sont proportionnels à leurs masses. En réfléchissant au chemin que nous avons parcouru pour arriver à mettre en évidence cette proportionnalité, on comprendra aisément qu'*elle n'est pas nécessaire*, mais qu'elle est *purement expérimentale*.

Une autre remarque s'impose. Nous avons utilisé le travail produit par la chute d'un poids pour entraîner notre chariot, uniquement parce qu'elle nous donnait, sur un long parcours, un effort constant, et conduisait sans détours à un résultat simple. Mais nous aurions pu tout aussi bien utiliser la force d'un ressort; seulement, comme cette force diminue à mesure que le ressort se détend, nous aurions été conduits à un résultat compliqué, que nous n'aurions pas interprété sans peine.

Un corps qui possède une vitesse restitue du travail en la perdant, et fait un certain effort le long d'un certain chemin. Ce qui frappe tout d'abord dans l'action du mobile, c'est l'effort. Une pierre lancée dans une vitre la brise par l'effort qu'elle exerce. Une observation superficielle pourrait donc faire assimiler l'attribut principal d'un corps en mouvement à une force, et c'est par là que l'on a commencé. Il en est resté la trace dans la terminologie des mécaniciens, qui désignent la quantité mv^2 $\left(\text{ou } \frac{mv^2}{2}\right)$ sous le nom de *force vive*, dénomination défectueuse, puisqu'elle consiste à nommer *force* une quantité qui contient une force, mais n'est pas une force, comme si nous nommions cerise un panier qui contient des cerises. Elle était mieux justifiée à l'époque où elle fut choisie, par le grand philosophe et mathématicien Leibnitz, qui distinguait entre la *force morte*, *effort sans mouvement* (par exemple effort d'une charge sur un support), et *force vive*, ou *force avec mouvement*. Cette terminologie s'est conservée dans la langue anglaise sous la forme de *living load* et *dead load*, c'est-à-dire *charge vivante* et *charge morte*. Sous cette forme, elle peut encore être défendue. Un poisson qui se débat à l'hameçon arrive à casser la ligne, alors que celle-ci résiste lorsqu'il renonce à se défendre; mais, sous la forme isolée où le terme « force vive » a été conservé dans le langage, il n'a plus aucun sens, même historique, et ne peut servir qu'à créer une confusion.

La quantité $\frac{mv^2}{2}$ est équivalente à un travail, mais ce n'est pas, à proprement parler, du travail dans le sens où ce terme a été défini. Nous ne pouvons donc pas la nommer *travail*. On lève la difficulté en convenant de rassembler sous le terme général d'*énergie* le travail et toutes les quantités qui résultent de sa transformation, ou qui peuvent, par leur transformation, produire du travail. Nous connaissons déjà deux formes de l'énergie, et nous apprendrons à en connaître d'autres. La forme d'énergie emmagasinée dans un corps en mouvement a reçu le nom d'*énergie cinétique*, sous laquelle nous la désignerons dans la suite. La périphrase la plus brève pour la masse est donc : *capacité énergétique*. Cette expression, malgré son aspect savant et rébarbatif, est venue d'elle-même s'offrir à nous.

22. — La puissance.

La quantité de travail fournie par le déplacement d'une force n'est pas la seule grandeur dont l'évaluation s'impose; nous devons connaître aussi le *taux de production de ce travail*, c'est-à-dire la quantité qui peut en être engendrée en un temps donné. Si une fourmi pouvait travailler pendant mille ans, elle accumulerait une quantité considérable de travail; elle pourrait monter des millions de grains de sable au flanc d'une montagne et les disposer en un tas au sommet; mais le sac de sable que le mulet transportera dans sa demi-journée représentera le même travail; et, si un funiculaire est installé sur les pentes de la montagne, il pourra, en quelques minutes, transporter bien des sacs dont chacun constituerait la charge du mulet. Nous exprimons cette différence en disant que le funiculaire est plus puissant que le mulet, et que celui-ci est plus puissant que la fourmi; et la qualité qui leur permet de produire plus ou moins de travail en un temps donné est ce qu'on nomme leur *puissance*. En anglais, cette qualité se nomme « power », mais on lui donne aussi le nom d' « activity », qui fait image autant que le premier. Un homme puissant peut produire beaucoup en peu de temps; il en est de même d'un homme actif; en somme, les deux termes se valent; mais, comme celui de puissance est bon, il n'y a aucune raison pour en changer.

Dans la comparaison que nous avons donnée, de la fourmi, du mulet et du funiculaire, la puissance pourrait être confondue avec une autre qualité relative de ces trois véhicules : leur force. C'est une confusion dont il faut se garder avec soin. Bien que fort, le mulet aurait pu refuser obstinément de marcher; il n'aurait pas produit de travail, et n'aurait développé aucune puissance.

La puissance est le quotient du travail par le temps employé à l'accomplir; mais le travail étant le produit $force \times longueur$, la puissance est : $force \times \frac{longueur}{temps}$, ou $force \times vitesse$.

Pour produire du travail il faut déplacer une force; pour agir avec beaucoup de puissance, il faut soit déplacer rapidement une force même moyenne, soit déplacer même lentement une très grande force.

Une machine puissante peut n'engendrer que des efforts peu considérables; il suffit, pour cela, qu'elle soit agencée de manière à produire de grandes vitesses ; et inversement, une machine de faible puissance produira de grands efforts si on ne lui demande que peu de vitesse.

Le moteur de propulsion d'un navire possède une grande puissance, qu'il dépense sur l'hélice, tournant à grande vitesse, et entretenant le mouvement d'une carène qui subit les effets de la résistance de l'eau. Mais, si un bateau est échoué, ce n'est pas toujours son hélice qui le renflouera; comme il s'agit ici d'exercer un effort considérable, mais qui n'a pas besoin de produire des déplacements rapides, on aura plutôt recours au cabestan, qui hâlera sur une ancre.

Une poinçonneuse, qui pratique des trous dans des tôles très épaisses en détachant d'un seul coup des rondelles de métal, est une machine extrêmement forte; mais elle travaille lentement, et peut être actionnée par un moteur de faible puissance, alors que la machine cent fois plus puissante d'un cuirassé serait absolument incapable de faire rendre à beaucoup près le même effort à l'extrémité des ailes de l'hélice. Pour la même raison, une auto que l'on veut faire démarrer en quatrième vitesse cale son moteur.

Nous distinguerons donc avec soin une machine forte d'une machine puissante; ces deux notions vont souvent ensemble, il est vrai, mais il est des cas nombreux où elles sont en complet désaccord. La force d'une machine est une qualité qui peut la faire rechercher, la puissance en est une autre. Les confondre témoignerait d'un même manque de précision que de prendre l'une pour l'autre la beauté et la bonté ; elles aussi sont désirables et vont souvent ensemble... mais pas toujours.

Dans le débit du travail, le taux et le temps peuvent s'échanger. Une machine de faible puissance, travaillant pendant longtemps, peut emmagasiner du travail dans une autre machine qui le rendra en un temps très court, et, par conséquent, avec une puissance considérable. C'est ainsi, par exemple, que, dans les grandes gares, on emploie une petite machine à monter de très gros poids qui, en redescendant, effectueront une manœuvre rapide, dont la machine serait tout à fait incapable. On peut, dans un but analogue, remplir d'eau un réservoir élevé, comprimer un gaz dans un récipient, comme celui d'un fusil à vent, etc. Le poids que l'on soulève lentement pour utiliser ensuite sa descente rapide est ce que l'on nomme un accumulateur de travail.

Inversement, on peut emmagasiner rapidement du travail qui est ensuite débité lentement : tel est le cas du poids des horloges ou du ressort des montres.

Ainsi les combinaisons peuvent varier à l'infini; on obtient à volonté un travail rapide ou lent : grande ou faible puissance; une seule chose ne peut pas être augmentée, c'est le travail total dont on dispose; on n'est maître que du taux de sa dépense; nous pouvons être économes ou prodigues de notre argent; mais le porte-monnaie ne crée pas son contenu; lorsqu'il est vide, il faut retourner à la source qui l'a déjà approvisionné.

23. — La conservation du travail.

Il ne sera pas inutile d'élucider encore les notions dont nous venons d'entrevoir la nature.

Nous avons compris que, pour produire ou pour utiliser un travail donné, nous pouvons choisir l'un des facteurs de chacun des produits : *force*×*chemin* ou *puissance*×*temps*; le second est alors imposé.

La première représentation du travail nous montre qu'une petite force se dépensant sur un long chemin peut engendrer une grande force sur un faible chemin; la seconde, qu'une petite puissance agissant depuis longtemps peut permettre la dépense brève d'une grande puissance.

Tout cela nous semblerait bien compliqué si nous en restions à ces énoncés; mais nous ne pouvons pas jeter les regards autour de nous sans voir des applications de ces principes.

Certainement, l'ouvrier emballeur serait bien embarrassé de les formuler, et pourtant, il en fait un usage constant. Il ne lui viendrait pas à l'idée, lorsqu'il veut enfoncer un clou, de le presser avec la main ou avec la tête de son marteau. Il soulève celle-ci pour lui permettre d'emmagasiner du travail quand elle retombera; à ce travail, il ajoute celui de son poignet, et la vitesse du marteau s'annulant sur un parcours plus faible que celui le long duquel il s'est mis en mouvement, l'effort qui en résulte fait pénétrer le clou dans le bois.

Pressons de toutes nos forces la tête d'un marteau contre une plaque de cuivre; il nous sera bien impossible d'y pratiquer la moindre dépression. Mais soulevons le marteau, et frappons-en un coup léger; nous verrons dans la plaque une empreinte durable. Elle est peu profonde, et nous en concluons que l'effort qui l'a produite était très considérable. En effet, si notre marteau a emmagasiné, par exemple, le travail produit par une force de 1 kilogramme sur un parcours de 2 décimètres, il sera devenu capable de restituer sur 2 dixièmes de millimètre un effort de 1 000 kilogrammes. C'est un effort de cet ordre qu'un enfant peut exercer en se jouant. Et, si nous reprenons d'autre façon le calcul, nous verrons qu'il a développé la puissance d'un moteur d'automobile rapide, mais seulement pendant un dix-millième de seconde.

Autrefois, les percussions étaient très usitées dans les industries métallurgiques. Pour arrondir les têtes des rivets, on frappait à grands coups de masse [1], et ce procédé était imposé par le travail à la main : il fallait multiplier considérablement l'effort de l'ouvrier, afin d'obtenir des déformations progressives du métal. Aujourd'hui, on préfère amener l'effort à agir directement, sans l'intermédiaire d'une masse mise en vitesse; mais l'ouvrier est remplacé par une machine puissante, susceptible de fournir elle-même, et d'une façon continue, l'effort obtenu autrefois par l'arrêt du marteau.

Galilée connaissait déjà cette relation de la force, du chemin et du travail. Il exprimait ce que nous venons

1. Le nom donné aux gros marteaux d'enclume montre bien que c'est leur *masse* qui est leur principale qualité.

d'exposer, en disant que la *force vive* est infiniment plus grande que la force, puisqu'elle peut faire équilibre aux forces les plus grandes. Un petit caillou, disait-il, jeté de bas en haut contre une pierre de taille posée sur un chantier la soulèvera d'une quantité extrêmement petite, mais la soulèvera.

Galilée exagérait un peu, car il négligeait, sciemment sans doute et pour mieux frapper l'esprit, certaines propriétés au moyen desquelles la matière atténue la portée de ce principe. Mais on pourrait imaginer des matières douées de propriétés telles que l'énoncé de Galilée fût rigoureusement vrai. En y mettant toutes les forces de nos deux mains, nous serions complètement incapables de déplacer la pierre de taille dont il parle, mais une chiquenaude la soulèverait. Il est vrai que son mouvement serait imperceptible, même au microscope.

Ce n'est pas seulement pour produire de grands efforts, que l'on peut utiliser cette propriété du travail emmagasiné de reproduire du travail utile. On veut parfois déplacer un objet d'une très petite quantité. Il résiste, et on sait que, si l'on réussit à le faire bouger, on ira trop loin, parce qu'on ne pourra pas détendre immédiatement ses muscles. Mais il reste la ressource de le frapper à petits coups; on dose le travail que l'on fait emmagasiner par un morceau de bois tenu à la main, et ce travail est absorbé de nouveau, sur un faible parcours, par les forces qui retiennent notre objet à sa place.

Ce principe étant bien compris, nous n'essaierons plus de répondre à cette question souvent posée : Combien pèse une personne qui saute? Cela dépend, dirons-nous. Oui, cela dépend de bien des causes diverses. Le travail de sa chute doit être compensé par un travail exécuté au moment où elle vient au contact du sol. Si celui-ci est très mou, le sauteur peut l'aborder n'importe comment : le travail sera supporté par l'effort qui s'exerce entre ses pieds et le sol; mais, s'il tombe sur un terrain dur, il devra absorber le travail dans ses muscles, par un fléchissement des genoux et de toutes les parties articulées de son corps. Faute de savoir le faire, il produira, sur un chemin très court, de grands efforts susceptibles de lui rompre les os. C'est ainsi, par exemple, que les skieurs trop confiants dans l'élasticité de leur chute restent sur la neige dure avec le fémur fêlé.

Ici encore, la science de l'emballeur est très grande. Si, d'une part, il cherche à réaliser un grand effort sur la tête d'un clou, il faut, d'autre part, qu'il épargne autant que possible les efforts aux objets fragiles qu'il prépare à voyager. Et l'on sait que les précautions prises dans les gares ou sur les débarcadères sont plutôt sommaires, même lorsque les caisses portent l'inscription : « Très fragile ». Lorsqu'une caisse tombe lourdement sur un quai, les objets qu'elle contient emmagasinent du travail et prennent de la vitesse. Ils perdent cette dernière en restituant leur travail; mais, pour éviter les efforts trop grands, il faut que le travail soit récupéré sur un chemin suffisamment long. C'est l'élasticité des copeaux qui en est chargée.

Pour saisir dans tous ses détails ce qui se passe lors d'une percussion, il est nécessaire de connaître parfaitement certaines propriétés de la matière. Avant d'en entreprendre l'étude, il nous reste encore à parcourir un domaine étendu.

24. — Action et réaction. Quantité de mouvement.

Voyons un oiseau prenant son vol du bout d'un rameau flexible : il replie sous lui ses petites pattes, et les détendant brusquement, fait un bond en avant, tandis qu'il ouvre ses ailes. A ce moment, fixons notre attention sur la branche : nous la voyons faire un rapide mouvement en arrière, puis reprendre sa position primitive après quelques oscillations.

Pourquoi la branche a-t-elle reculé? Evidemment parce que, en se poussant en avant, l'oiseau la repoussait en arrière. C'est là une constatation qualitative.

Mais on peut aller un peu plus loin : un cheval traînant une voiture exerce un effort sur les traits, qui le transmettent au palonnier. La voiture ne prend pas d'accélération, à cause de la résistance de la route; mais les traits sont entièrement libres, et, s'ils étaient soumis, à leurs deux extrémités, à des efforts différents, ils prendraient une accélération. On peut considérer les traits comme faisant partie au point de vue mécanique soit du cheval, soit de la voiture; et une réflexion immédiate nous conduit à formuler le principe quantitatif de l'action et de la réaction, auquel Newton a donné pour la première fois une forme précise; nous pourrions l'exprimer sous les termes suivants : *Lorsqu'un corps en pousse un autre, l'effort de celui-ci sur le premier est égal à l'effort du premier sur celui-ci.*

Nous examinerons plus tard quelques-unes des conséquences de ce principe, auquel on attribue en quelque sorte la nature d'un axiome; pour le moment, nous nous bornerons à en déduire, par des considérations très simples, un autre principe d'une grande importance.

Les efforts commencent et cessent naturellement au même instant pour les deux corps; il y a donc, pour tous deux, une quantité qui reste la même : c'est le produit de l'effort par sa durée.

Distinguons soigneusement le produit de l'effort par le temps, que l'on nomme l'*impulsion*, du produit de l'effort par la longueur, qui est le *travail*.

Dans le coup de canon, les gaz de la poudre poussent le projectile d'un côté et le canon de l'autre; pour envoyer l'obus en avant, ils s'appuient sur la culasse de la bouche à feu, et l'effort qu'ils exercent sur cette dernière est au moins aussi grand que celui qu'éprouve le culot de l'obus : *au moins*, puisque les gaz eux-mêmes sont poussés en avant; mais nous pouvons négliger cette action, et nous souvenir seulement qu'en disant que l'effort sur la pièce est égal à celui qui s'exerce sur le projectile, nous désavantageons plutôt la première. Or, si les gaz emmagasinaient dans la pièce un travail égal à celui qu'emporte le projectile, elle serait elle-même un projectile fort dangereux, puisque tout ce travail devrait être absorbé à son tour pour amener le canon au repos.

Mais ce n'est pas le travail des gaz de la poudre qui est le même sur les deux parties mobiles du système : c'est l'impulsion.

Cette égalité des impulsions peut être reportée sur un autre produit.

Nous avons vu que la force f est le produit de la masse m par l'accélération a

$$f = ma.$$

D'autre part, la vitesse est le produit de l'accélération par le temps

$$at = v.$$

Multiplions les deux équations membre à membre, nous trouvons

$$ft = mv.$$

Le produit de la masse par la vitesse pour l'obus doit donc être le même que pour le canon, en supposant, bien entendu, qu'aucune autre force que celle des gaz de la poudre n'a agi sur l'un et l'autre. Leur action est tellement prépondérante pendant la durée très courte (de l'ordre du centième de seconde) du coup de canon, que le résultat est très approximativement vrai au moment précis où l'obus quitte la bouche à feu. Notre principe ne s'occupe plus, bien entendu, de ce qui se passe alors que le projectile subit la résistance de l'air et la bouche à feu l'action de ses freins.

Les vitesses sont dirigées en sens contraires; et, si nous convenons de donner à l'une des directions le signe positif, d'où résultera le signe négatif pour l'autre, nous voyons que la somme algébrique des produits est nulle.

Supposons maintenant que notre canon soit placé dans la tourelle avant d'un cuirassé tirant en chasse. Pour un spectateur occupant la tourelle, rien n'est changé par rapport à l'expérience précédente. Mais, si nous observons du rivage le mouvement du canon et du projectile, nous serons conduits à ajouter la vitesse propre du navire à la vitesse mesurée pour chacun d'eux par l'observateur de la tourelle. Tout calcul fait, nous trouverons, après comme avant le tir, pour la somme des produits des masses par leurs vitesses dirigées, simplement la somme des masses multipliée par la vitesse du navire.

Descartes a nommé *quantité de mouvement* le produit d'une masse par sa vitesse. Notre expérience, et toutes celles que nous aurions encore pu faire, nous indique que *la quantité de mouvement de plusieurs masses agissant l'une sur l'autre, sans que des forces extérieures interviennent, est constante*. C'est le *principe de la conservation des quantités de mouvement* [1].

On ne peut donc pas déplacer un objet en faisant agir uniquement des forces internes. Assis sur un chariot ou dans un bateau, nous ne pouvons pas les mettre en mouvement par les efforts de notre corps sans point d'appui extérieur. Nous pouvons bien faire avancer et reculer alternativement une barque légère en marchant successivement vers l'arrière et l'avant. Lorsque nous prenons de la vitesse, elle en prend; lorsque nous nous arrêtons, elle s'arrête; lorsque nous revenons nous asseoir sur notre banc, elle revient à sa première position. Pour la déplacer, il faut faire agir des forces extérieures, prendre appui sur l'eau, hâler sur une corde ou utiliser l'action du vent. On le pourrait aussi en essayant de sauter d'une barque sur la rive. Si nous tentons l'expérience, nous verrons qu'en effet la barque recule définitivement; mais elle a perdu son chargement, et s'est modifiée; nous aussi d'ailleurs, car nous aurons fait un plongeon.

Nous retrouverons des applications du principe qui vient d'être exposé; mais il est temps que nous cherchions à comprendre comment naît le repos, alors que les forces semblent toujours produire des mouvements.

1. « Bien que le mouvement ne soit qu'une façon en la matière qui est mue, elle en a pourtant une certaine quantité qui n'augmente et ne diminue jamais, encore qu'il y en ait tantôt plus et tantôt moins en quelques-unes de ses parties ». (Descartes, *Principes de Philosophie*, 1644.)

CHAPITRE V

LES FORCES SANS LE MOUVEMENT

25. — Les réactions de la matière : l'élasticité et le frottement.

Les forces ne produisent pas toujours des mouvements. Nous sommes tout entourés d'objets qui sont soumis à des forces, et cependant ne bougent pas. Les livres sur leur étagère, l'encrier sur la table, la table elle-même reposant sur le plancher sont actionnés par une force qui n'est autre que leur poids; mais, à l'endroit même où chaque objet est supporté, il développe une force antagoniste, la *réaction*, qui annule exactement l'*action* du poids. Le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, que nous avons rencontré pour les corps en mouvement, se retrouve pour les corps en repos. Nous dirions volontiers qu'il s'y retrouve *a fortiori*, si l'un des principes pouvait être plus vrai que l'autre. Ils sont, en réalité, aussi vrais l'un que l'autre, mais la réaction d'un support sur l'objet immobile qu'il maintient en place semble bien plus évidente que celle d'un objet libre de se déplacer, et qui se meut sous l'action d'une force exercée par un autre objet.

Cependant, il nous est arrivé à tous de sortir par un jour de verglas, et la difficulté que nous avions à ne pas tomber, les contorsions que nous devions nous imposer pour nous tenir debout, nous ont fait comprendre qu'en temps ordinaire le sol sur lequel nous marchons possède une propriété très précieuse, celle grâce à laquelle nous pouvons tenir en place sans efforts désordonnés. La même réflexion nous est venue lorsque nous avons roulé, à bicyclette, sur du pavé gras et dérapant, ou, pour peu que nous songions aux autres, quand, sous nos yeux, un cheval de fiacre s'est abattu sur le bitume. Nous avons vu alors un concierge compatissant jeter, sous les pattes de la pauvre bête, une pleine pelletée d'escarbille; et, les sabots mordant sur le sol, le cheval se relevait sans trop de peine.

En réfléchissant à ces quelques observations, nous n'avons pas tardé à découvrir tout ce que nous devons à un phénomène très bienfaisant, qui est le frottement. Les ingénieurs cherchent à l'éviter autant que possible dans les machines, et ils font bien. Dans les cours de mécanique appliquée, on décrit le frottement comme l'abomination de la désolation ; et là encore on a raison, mais seulement dans un petit domaine très spécial. Partout ailleurs, nous devons bénir le frottement, qui nous permet de marcher, de nous installer à notre table et de travailler sans craindre de voir nos livres et notre écritoire tomber sur le parquet, la table glisser jusqu'à l'angle de la chambre, la plume même s'échapper de nos doigts.

Le frottement est un phénomène si constant que, à de rares exceptions près, nous ne songeons même pas à l'appeler à notre aide; il se présente de lui-même à nous, et vient nous offrir ses services. Parfois on les dédaigne, et on s'en trouve mal. Depuis leurs contacts fréquents avec les Européens, les Abyssins se sont mis à porter des chaussures, dont ils sont très fiers. En ont-ils vraiment lieu? Il ne le semble pas, si l'on en croit quelques observateurs attentifs. La terre des montagnes de l'Erythrée est souvent humide et glissante; les orteils s'y agrippent à peu près, mais les chaussures y glissent; les Abyssins y deviendront moins agiles, moins aptes à se déplacer rapidement et même à combattre. Pour eux, comme pour nous, mais pour d'autres raisons, la chaussure aura été l'un des méfaits de la civilisation.

Le frottement est ce qui donne de la stabilité. Le charpentier nivèle, sans aucune peine, un plancher de telle sorte que les tables ou les chaises restent là où on les a placées. Sauf sur mer, les plats, les assiettes ou les verres posés sur une table ne nous donnent aucune inquiétude. Mais, si nous voulons faire tenir une boule de bois sur une planche rabotée, il faut déjà prendre la peine de la caler; et si nous voulons maintenir une bille d'acier sur une glace, il faut poser celle-ci sur un support muni de vis calantes. Lorsque la bille ne roule plus, nous savons que la glace est à très peu près de niveau. Elle ne l'est pas complètement, puisque nous pouvons retoucher très légèrement le calage sans que la bille se mette à rouler; elle reste en place dans une région de très petits angles d'inclinaison de la glace, beaucoup plus petits que ceux de la planche portant la boule et surtout de la table sur laquelle repose un livre.

Nous pouvons maintenant raisonner comme nous l'avons toujours fait; nous pouvons dire : par l'expérience, nous avons amené le frottement à une valeur extrêmement faible; imaginons que le frottement puisse être complètement annulé, alors jamais deux objets, gros ou petits, quartiers de roc ou grains de sable, ne resteront l'un sur l'autre. Tout glissera ou roulera jusqu'à ce que tout soit de niveau. Sans le frottement, la terre serait une sphère sans aucune aspérité; elle serait semblable à une sphère liquide.

La cause du frottement est souvent évidente : lorsque deux planches non rabotées sont posées l'une sur l'autre, leurs aspérités s'agrippent entre elles et s'opposent les unes aux autres des obstacles directs. Mais une bille d'acier sur une glace n'est pas retenue en place par des aspérités visibles. Il se produit alors deux phénomènes dont voici le premier : au point de contact avec la glace, la boule s'aplatit très faiblement (fig. 16) tandis que la glace se creuse très peu. Pour quitter sa position, la boule devrait donc remonter de son creux; et c'est seulement lorsque, par une inclinaison suffisante de la glace, on a amené le talus de ce minuscule fossé à présenter une faible pente vers l'extérieur, que la boule en sort et se met à rouler. »

Qu'il s'agisse de rouler ou de glisser, la cause du frottement est souvent celle que nous venons de trouver. Un chariot marchant en terrain mou enfonce et trouve toujours, à l'avant des roues, une pente à remonter.

Nous découvrirons sans peine le second phénomène grâce auquel la boule reste en place. Si nous l'avions mise au fond d'une cuvette, nous ne chercherions pas la cause de son immobilité. Or, si nous posons sur deux appuis une glace dont la forme naturelle est celle d'un plan parfait, elle fléchit en formant comme une sorte de couloir, très peu profond assurément, et dont le creux ne nous apparaît que si nous l'observons par des procédés très délicats.

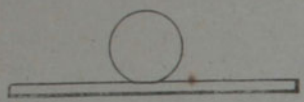


Fig. 16. — Posée sur un plan, une boule le creuse, et s'aplatit dans la région du contact.

Si la glace est appuyée sur tout son pourtour, elle se creuse; nous ne le voyons pas, parce que le creux est d'une profondeur infime; mais nous savons très bien que, si nous nous asseyons sur une chaise cannée, nous pratiquons dans le siège un creux apparent; nous voyons encore celui qu'y marque un bébé; et, si nous diminuons graduellement le poids posé sur la chaise, un moment viendra où le creux ne sera plus perceptible; mais il nous est impossible de fixer l'instant où il n'existe plus, et nous en concluons que, lorsque nous ne le voyons pas, c'est que nous ne savons pas nous y prendre.

Un rail de douze mètres posé par ses extrémités sur deux appuis nous paraît certainement creux. Un rail plus court se creuse aussi, quoique beaucoup moins; et, si nous disposions de procédés très délicats, nous apercevrions la flexion que subit un rail d'un mètre lorsque nous appliquons en son milieu l'effort qu'un cheveu permet d'exercer sans se rompre.

Visiblement ou imperceptiblement pour nos moyens d'investigation, la matière se déforme ainsi par le contact d'une autre matière; la déformation, localisée autour du contact ou intéressant tout le support, est la cause de sa réaction, qui fait équilibre au poids du corps supporté.

Nous étudierons plus tard les réactions de la matière; il nous suffit de savoir qu'avec les frottements, elles donnent à la nature sa stabilité. Nous le comprendrons plus complètement lorsque nous aurons analysé un phénomène très simple, et auquel cependant on songe rarement.

Faisons passer sur une poulie parfaitement équilibrée un fil très fin, portant à chaque extrémité un petit plateau, et mettons du sable dans chacun de ceux-ci. Il ne nous sera pas trop difficile d'égaliser le sable suffisamment pour qu'aucun des deux plateaux n'entraîne l'autre. Nous pourrons alors retirer de l'un d'eux un grain de sable, puis un second, puis un troisième, jusqu'au moment où, la différence des charges étant suffisante, l'équipage se mettra en mouvement. Nous pouvons répéter l'expérience dans l'autre sens, et constater qu'il existe une sorte de région de repos, dans laquelle le système n'a aucune tendance à se mouvoir : et, cependant, nous savons bien que l'un des plateaux est plus lourd que l'autre.

C'est qu'aux forces exercées par eux sur le fil sont venus s'ajouter toutes sortes d'efforts : flexion du fil, flexion de l'axe de la poulie, frottement de celui-ci dans ses paliers, qui ont toujours agi de manière à s'opposer aux déplacements; ces efforts assurent le repos.

En l'absence de ces forces, nous ne pourrions jamais réaliser l'immobilité complète des plateaux; nous égaliserions à un grain de sable près; la prépondérance d'entraînement serait extrêmement faible, mais elle existerait toujours. Nous pourrions broyer le grain de sable dont une fraction produit l'excédent, et mettre une à une ses particules microscopiques dans le plateau le plus léger; un moment viendrait où l'un de ces grains de poussière détruirait dans un sens l'équilibre qui, auparavant, faisait défaut dans l'autre sens.

Le frottement, les réactions de la matière, nous dispensent de cette pénible recherche d'un équilibre jamais atteint; elles engendrent les forces passives qui s'opposent aux forces actives; elles créent le repos.

Nous savons maintenant que ce repos peut exister, et comment il est engendré. Nous pouvons donc étudier les forces dont l'équilibre est assuré autrement que par une sorte de miracle d'égalité mathématique.

26. — Les forces en équilibre; Composition et décomposition des forces.

Lorsqu'il pleut par un temps calme, nous tenons notre parapluie bien au-dessus de notre tête; mais, quand le vent souffle, nous l'inclinons vers lui pour nous protéger. Nous savons en effet que la pluie ne tombe pas toujours verticalement sur le sol; lorsque le vent la chasse, elle tombe obliquement, et peut nous atteindre à mi-corps, même si notre tête est parfaitement protégée.

Nous connaissons déjà assez de mécanique pour que ce désagréable phénomène n'ait plus pour nous de secrets. Chaque goutte de pluie est soumise à deux forces : une force verticale, qui est la différence entre son poids et la résistance que l'air oppose à sa chute; l'autre horizontale, qui est l'effort du vent, effort bien réel et parfois considérable, puisque c'est lui qui pousse les bateaux à voile, et, dans les bourrasques, déracine les arbres ou abat les cheminées. Quelle direction prendra la pluie sous l'action de ces deux forces? Pour le deviner, nous allons faire une hypothèse qui semble bien évidente : nous allons supposer que rien n'est changé si les deux forces agissent séparément, chacune pendant un temps très court; lorsque l'une aura fini, le temps recommencera, et l'autre interviendra à son tour pendant le même intervalle de temps.

Agissant ainsi, chacune des forces donnera à la goutte de pluie une accélération proportionnelle à sa valeur. Les vitesses, qui sont la somme des accélérations, seront également proportionnelles aux forces. et la goutte de pluie tombera suivant la diagonale du parallélogramme des vitesses, que nous avons appris à connaître (§ 12).

Si nous représentons par les deux flèches OA et OB (fig. 17) les chemins que parcourrait la goutte dans un temps donné si elle était soumise à une seule des forces, leur ensemble lui fera parcourir le chemin OR.

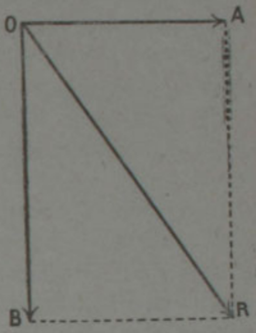


Fig. 17. — Composition des effets des forces.

Supposons maintenant que les flèches ne soient plus des *représentations* des chemins, mais des *symboles* : les symboles des forces Alors la flèche OR sera le symbole de la force qui entraîne la goutte de pluie suivant la direction OR, avec une accélération représentée par OR, à la même échelle que les deux accélérations isolées sont représentées par OA et OB. La flèche OR représentera donc, en grandeur et en direction, la force qui produirait le même effet que OA et OB. On nomme *résultante* cette dernière force, dont les deux premières sont les *composantes*; et le théorème que nous venons de découvrir est ce qu'on nomme le théorème du parallélogramme des forces. Il peut être énoncé dans les termes suivants :

La résultante de deux forces est représentée, en grandeur et en direction, par la diagonale du parallélogramme construit sur les droites représentant ces deux forces.

Nous avons trouvé sans peine ce principe, simplement en nous souvenant de ce que nous avions appris. Mais nous pouvons y revenir par une autre voie, en opposant les forces les unes aux autres de telle sorte que leurs effets s'annulent.

Commençons par le commencement. Nous pouvons suspendre un poids à une corde, et accrocher un second poids sous le premier; mais nous pouvons aussi accrocher les deux poids directement à la corde. Nous ne douterons pas que la corde ne soit tendue les deux fois de la même façon, et nous en conclurons que deux forces (nous aurions pu dire également dix ou vingt forces) peuvent être rassemblées dans une force unique, qui est leur somme [1].

Les poids ne tombent pas : c'est que la corde les soutient, et oppose, comme nous l'avons vu, à la force qui les attire vers le sol, un effort exactement égal, mais dirigé dans le sens opposé.

On peut donc non seulement additionner les forces, mais aussi les retrancher les unes des autres, et enfin les équilibrer.

Nous nous servirons, pour garder le symbole de ce principe, de la même représentation que tout à l'heure. Chacun de nos poids sera figuré par une flèche (fig. 18) dont la longueur lui sera proportionnelle. Nous abouterons ces deux flèches, et, dans la direction opposée, nous dessinerons une flèche dont la longueur soit égale à la somme de leurs longueurs respectives.

1. Voyons combien il faut nous méfier : l'expérience décrite ci-dessus est évidente, et cependant elle est légèrement erronée dans la forme où elle est proposée. En effet, en suspendant les deux poids l'un à l'autre, nous mettons l'un d'eux plus près du centre de la terre qu'en l'accrochant directement à la corde. Il est donc un peu plus lourd (voir § 27); et, si nous substituions à la corde le plateau d'une balance très sensible, nous trouverions une différence extrêmement petite, mais cependant mesurable. Si l'on soulève un kilogramme de 1 décimètre, l'effort qu'il exerce sur son support est diminué de 2 à 3 centièmes de milligramme.

Il fallait mentionner cette expérience pour montrer : 1° que l'évidence est parfois trompeuse; 2° que des mesures de haute précision enseignent beaucoup plus que des expériences vulgaires; 3° comment un principe parfaitement vrai peut être faussé en apparence par un tout petit phénomène parasite.

Les meilleures expériences doivent être interprétées avec bon sens. Un physicien très habile mais ignorant, qui ferait pour la première fois celle qui vient d'être décrite, douterait-il de la possibilité d'additionner les forces sans les modifier? Cela est peu probable; des deux explications admissibles de la petite différence trouvée, il découvrirait probablement sans peine la seconde; cependant, cela n'est pas certain, et il chercherait peut-être longtemps.

Nous aurons une image physique de cette représentation si nous nous servons d'un long ressort à boudin, que nous chargerons de poids ne lui donnant pas une trop forte extension. Suspendons-lui successivement deux poids, et notons ses allongements, puis accrochons les deux poids ensemble; l'allongement total sera la somme des deux allongements isolés.

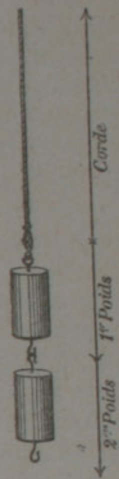


Fig. 18. — Les forces agissant dans le même sens s'ajoutent; on peut les équilibrer par une force égale à leur somme.

Encore une définition : on nomme *point d'application* d'une force l'endroit où elle s'accroche pour agir.

Nous pouvons atteler un cheval entre les timons ou le faire tirer sur une corde attachée à la cheville ouvrière de la voiture, et donner à cette corde une longueur quelconque Nous en concluons qu'on peut, sans changer ses effets, déplacer le point d'application d'une force dans la ligne même de celle-ci.

Mais on ne peut pas, sans modifier son action, déplacer une force latéralement. En attelant le cheval à un bout d'essieu, on fait tourner la voiture; nous en connaîtrons bientôt la raison.

Comme dans le cas de la goutte de pluie chassée par le vent, les forces n'ont pas toujours la même direction.

Lorsque, pour la formation d'un train, on attelle un cheval au wagon que l'on veut amener sur la ligne, on le fait tirer le plus près possible du rail, et parallèlement à sa direction, parce qu'on sait que les efforts obliques produisent moins d'effet. Mettons tout à l'extrême; supposons que le cheval tire exactement par le travers de la voie; le wagon sera pressé contre les rails, mais ne démarrera pas; or l'effort du cheval dans le sens de la voie n'est pas subitement annulé dans son entier, au moment précis où la traction s'exerce perpendiculairement à la voie; il l'est peu à peu, graduellement, à mesure qu'elle s'éloigne davantage de la direction des rails.

Nous allons étudier de plus près les lois de la variation des forces agissant obliquement.

Un Hollandais doué d'un grand génie, qui vivait il y a trois siècles, Stévin (1548 à 1620), imagina parmi beaucoup d'autres l'expérience suivante, qu'il n'eut pas besoin de réaliser, parce que le résultat en était évident.

Sur un triangle de bois ABC (fig. 19), dont un des côtés est horizontal et l'autre vertical, on dispose un chapelet de boules réunies par des attelages et susceptibles de rouler sans frottement. Ce chapelet se ferme au-dessous du triangle par une guirlande forcément symétrique. Le bons sens nous dit que le chapelet ne se mettra pas de lui-même à tourner autour du triangle ; donc les forces qui l'actionnent se font mutuellement équilibre.

Or on peut décomposer le chapelet en trois parties constituant respectivement la guirlande et les deux côtés du triangle. La première étant symétrique, ses deux moitiés annulent leurs effets ; donc les deux sections rectilignes se font équilibre. Cependant, la section BC est beaucoup plus courte, et, par conséquent, moins lourde que la section AB ; le côté oblique du triangle annule donc une partie du poids du chapelet, et c'est la fraction restante qui tire seule sur la chaîne au point B.

Nous pouvons maintenant modifier l'expérience de Stévin et la mettre sous une forme qui, tout en étant un peu moins évidente, est plus facilement réalisable : c'est celle qu'a imaginée Galilée.

Remplaçons (fig. 20) les sections AB et BC de la chaîne par des poids qui leur soient égaux, et qui soient attelés à une corde passant sur une poulie située en B. L'un des poids sera suspendu directement au fil, l'autre sera constitué par un chariot roulant sur le côté du triangle ; l'ensemble restera encore en repos.

Le chariot n'agira donc sur la corde que par une fraction de son poids telle qu'il fasse équilibre au poids librement suspendu ; et comme les deux poids sont respectivement proportionnels aux côtés AB et BC du triangle, on en conclut que le poids du chariot a été réduit dans la proportion de BC à AB.

Nous pouvons maintenant utiliser notre symbole, et représenter par MN la valeur du poids suspendu. Celui du chariot sera représenté par PQ'. La fraction agissant sur la corde sera PR, quantité égale à MN; le triangle, de son côté, supportera un effort représenté par PS. Le triangle PQS étant semblable à ABC, les rapports des forces sont bien ce qu'ils doivent être, conformément à l'expérience imaginée par Stévin. Nous retrouvons ainsi le principe du parallélogramme des forces.

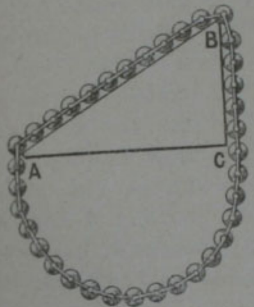


Fig. 19. — Un chapelet de billes supporté par un triangle reste en repos.

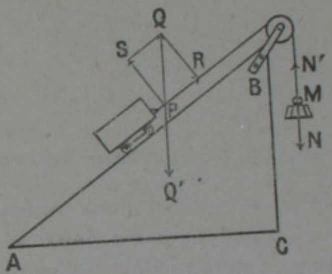


Fig. 20. — On maintient un chariot sur un plan incliné à l'aide d'un effort inférieur à son poids.

Si nous coupions l'attache de notre chariot, il roulerait le long du plan incliné; son accélération, moindre que celle de la chute libre, dans le rapport de PR à PQ, permettrait de suivre facilement son mouvement. Lorsque Galilée (§ 6) entreprit d'étudier les lois suivant lesquelles un corps roule sur un plan incliné, il avait pour but principal d'arriver, par un chemin détourné et plus facile à suivre, à découvrir les lois de la chute libre.

Revenons au symbole. Si nous voulons composer plusieurs forces, nous commençons par en composer deux, puis nous agglomérons une troisième et ainsi de suite. OA et OP (fig. 21) donnent la résultante OP; celle-ci avec OC donne OQ, cette dernière avec OD amène à la résultante définitive OR. Nous pouvons effacer du dessin les lignes OP, BP; OQ, CQ; DR, et ne conserver que le polygone APQR, enfin la résultante OR. La ligne brisée OAPQRO est ce qu'on nomme le *polygone des forces.*

Comme nous pouvons remplacer plusieurs forces par une force unique, de même nous pouvons décomposer une force en plusieurs autres : et cette complication apparente nous permettra, comme pour la vitesse, une simplification finale. Projetons une force sur deux axes rectangulaires; nous aurons ses deux composantes. Projetons sur les mêmes axes toutes les forces que nous aurons à considérer, et additionnons toutes les composantes, qui tombent ainsi dans les deux axes ; nous en constituerons deux résultantes partielles, au moyen desquelles nous pourrons ensuite recomposer une résultante unique.

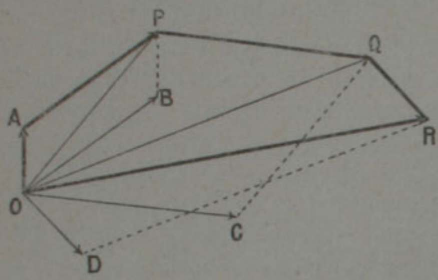


Fig. 21. — Polygone des forces

Mais les forces ne sont pas toujours dans le même plan : elles peuvent occuper toutes les directions de l'espace. Cela cependant ne doit pas nous arrêter, car deux forces concourantes sont toujours dans le même plan, puisqu'elles le définissent ; on peut donc les composer comme nous venons d'apprendre à le faire ; puis, avec la première résultante et une troisième force, nous constituons une seconde résultante et ainsi de suite ; il suffit de faire le dessin pour voir que l'on peut trouver la résultante finale au moyen d'un polygone des forces dans l'espace.

De même, si, au lieu de nous en tenir à deux axes rectangulaires, nous établissons un système de trois axes OX, OY, OZ (fig. 22) au moyen desquels nous pouvons atteindre tous les points de l'espace, nous pouvons, dans chacun des plans formés par l'un des trois axes et une force, projeter cette dernière de manière à la remplacer par ses trois composantes Ox, Oy, Oz. Des forces concourantes en nombre quelconque pourront donc être ainsi décomposées, et ramenées à la somme de toutes les forces situées le long de trois axes rectangulaires; finalement, on n'aura que trois forces rectangulaires à composer entre elles. Cette représentation est souvent fort utile.

Nous composons constamment des forces, parfois comme M. Jourdain faisait de la prose : sans le savoir; ou bien souvent aussi très consciemment, à la manière de cet orateur bien intentionné mais médiocre latiniste, qui concluait un appel à l'union par ces mots : « *Sursum corda*, tirons tous sur la même corde ». C'est, en effet, en tirant sur la même corde que nous ajoutons nos efforts et les rendons efficaces; on est souvent surpris de voir combien l'aide mutuelle allège la tâche de chacun. Sans sortir du domaine de la mécanique, nos jeunes amis pourront unir leur efforts pour soulever un de leurs camarades, qu'il ne sera même pas nécessaire de choisir parmi les plus maigres. Celui-ci s'assiéra, tandis que chacun lui appliquera un seul doigt partout où il trouvera un point d'appui : sous les pieds, sous les jarrets, sous les aisselles, sous les coudes, sous le menton; et, au commandement de *trois*, chacun fera effort de bas en haut; le jeune homme semblera s'élever tout seul, car chacun aura la sensation de n'avoir guère soulevé qu'une plume.

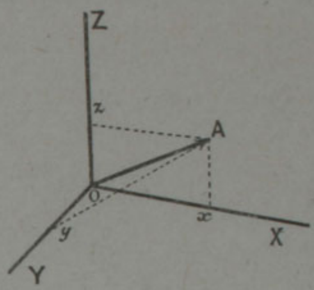


Fig. 22. — Composition des forces dans l'espace

Il suffit de regarder autour de nous pour voir associer des forces : on attelle plusieurs chevaux aux voitures lourdes; et, bien que nous ne les voyions pas, nous savons qu'on fait agir, sur une automobile, l'équivalent de quarante chevaux. Un grain de poudre dans un canon ne produirait aucun effet; la quantité des grains chasse le projectile.

Il est surtout une grandiose addition de forces qui régit, dans la nature, des mouvements prodigieusement vastes ; c'est celle des forces d'attraction de la matière pour la matière. Il est temps que nous apprenions à la connaître, car nous l'avons déjà rencontrée maintes fois au cours de cette initiation.

27. — La loi d'attraction, le poids et la masse.

On peut apprécier diversement notre séjour terrestre, le considérer comme heureux ou malheureux, agréable ou plein de tristesse ; mais le fait que nous vivons sur la terre plutôt que dans la lune ne doit agir en aucune façon sur notre conception des principes de la mécanique. Le savant doit être capable de se détacher assez de ce qui l'entoure pour en libérer complètement son jugement, tout comme un fonctionnaire intègre doit faire taire ses amitiés ou ses haines lorsqu'il s'agit pour lui d'accomplir un acte de ses fonctions. Mais, avant d'avoir trouvé la vérité, le chercheur ne peut encore distinguer ce qui est essentiel de ce qui est accessoire. Le témoignage immédiat de ses sens est son premier, et pendant longtemps, son seul renseignement. C'est pourquoi le développement de la mécanique a été intimement lié aux circonstances qui accompagnent notre séjour sur la terre. N'avons-nous pas nous-mêmes utilisé la pesanteur (§ 14) pour découvrir des lois fondamentales ? Nous avons reconnu aussi que les poids sont en relation intime avec les masses ; lorsque nous aurons étudié la pesanteur en elle-même, cette relation d'une grande importance nous deviendra plus claire.

Pour les peuples anciens, le haut et le bas étaient des notions bien précises. Elles le sont encore pour tous les enfants et pour bien des hommes de notre temps. Le haut est la direction opposée à la terre, le bas est la direction de la terre. Comme la terre est très grande par rapport à ses habitants, elle nous paraît plane en moyenne, et nos observations immédiates semblent nous enseigner que les droites qui définissent la direction du haut en bas sont partout parallèles. Aussi longtemps qu'on n'avait pas abandonné cette croyance, la chute des corps vers la terre était une nécessité, comme l'existence même du haut et du bas. Aristote et son école enseignaient que chaque corps cherche sa place, et que, pour tous, la place est aussi bas que possible. Si chaque corps ne tombe pas indéfiniment, c'est que les places sont déjà occupées.

La croyance antique voulait que le monde fût partagé, par la surface de la terre, en deux espaces distincts, les espaces supérieurs et les espaces inférieurs. C'est dans ces derniers que les peuples primitifs plaçaient le séjour des méchants, d'où le nom d'*enfer* (inferos) qu'ils lui avaient donné.

Mais l'ombre de la terre sur la lune pendant les éclipses, la disparition graduelle de la côte dans le départ d'un port, les observations astronomiques dans la circumnavigation, celle-ci considérée pour elle-même, ont fini par convaincre les hommes que la terre est approximativement sphérique. Et comme, en chacun de ses points, le bas est la direction du sol, chaque point de la terre définit une direction haut-bas, qui n'est parallèle à aucune autre, si ce n'est à celle du point diamétralement opposé, avec cette différence que le haut de l'un est le bas de l'autre [1].

Transportée dans la science moderne, l'idée ancienne de la chute des corps pourrait donc être traduite en ces termes : Tous les corps ont une tendance à se rapprocher de la terre. Mais, comme les directions haut-bas sont en nombre infini, notre idée est beaucoup plus compliquée que la croyance antique, qui était la simple constatation d'un fait simple lui-même. Pour revenir à la simplicité, que nous devons toujours chercher, il faut d'abord élucider, par l'observation, quelques-unes des particularités de la pesanteur.

Que l'on monte sur une montagne ou que l'on s'enfonce dans une mine, que l'on s'élève dans l'atmosphère au

1. On lira avec beaucoup de profit, dans l'*Initiation astronomique*, le développement que M. Flammarion a donné de cette idée.

moyen d'un ballon, toujours les corps lourds ont une tendance à descendre. L'action qu'exerce la terre sur les corps n'est donc pas limitée au voisinage immédiat de sa surface, et on constate qu'elle varie très peu dans les limites où nous pouvons nous en éloigner, soit vers le bas, soit vers le haut. Existe-t-il une distance de la terre où cette action cesse brusquement? On n'en voit pas la raison. L'hypothèse serait hardie au point d'être absurde. C'est ainsi que raisonna Newton : il n'hésita pas à admettre que l'attraction de la terre s'exerce à la distance où se trouve la lune, affaiblie sans doute, mais encore très efficace.

Pourquoi, dès lors, la lune ne tombe-t-elle pas sur la terre? Pour une raison très simple : elle possède une vitesse de translation qui tendrait à l'éloigner constamment de la terre, à mesure que l'attraction cherche à l'en rapprocher.

Nous avons vu qu'un projectile lancé horizontalement tombe en décrivant une parabole. Mais, l'accélération de sa chute étant constante, la parabole sera d'autant plus tendue que sa vitesse sera plus grande.

Supposons (Newton avait déjà ce raisonnement à sa disposition) un canon braqué horizontalement hors des limites de l'atmosphère (fig. 23), de manière à ce que le projectile n'éprouve aucune résistance de la part du milieu, et imaginons que ce canon envoie des projectiles avec des vitesses de plus en plus grandes. Ces projectiles tomberont à des distances croissantes; finalement, la vitesse pourra permettre au projectile de tomber en dehors des limites de la terre; il tournera autour d'elle, parce que l'accélération, en chaque instant, sera juste suffisante pour le retenir concentriquement à notre globe. La courbe de la chute ne sera plus une parabole comme dans le premier cas. Il y a en effet, dans le problème, quelque chose de changé; aussi longtemps que la trajectoire de notre projectile était entièrement contenue dans un espace tel que les directions verticales pouvaient être considérées comme parallèles, la courbe de la chute était une parabole. Puis, celle-ci s'est déformée à mesure que les directions de la pesanteur ont compris entre elles des angles de plus en plus grands; et enfin, lorsque la vitesse a été telle que la variation de direction de la trajectoire a été équivalente à la variation de direction de la pesanteur, la trajectoire a coupé perpendiculairement les verticales des lieux traversés, c'est-à-dire qu'elle est devenue horizontale en chacun de ses points. C'est grâce à cette compensation exacte de l'accélération et de la tendance à l'éloignement en ligne droite, qu'un projectile lancé horizontalement pourrait conserver une trajectoire horizontale, et tourner autour de la terre sans jamais s'arrêter. Il lui suffirait de posséder une vitesse un peu supérieure à 8 kilomètres par seconde, vitesse sept fois plus grande que celle des projectiles les plus rapides, mais bien inférieure à celle de certains météorites qui croisent l'orbite de la terre, se dévient de leur direction à son approche, puis reprennent leur course dans l'espace. Seuls, parmi ces météorites, ceux qui ont le malheur de s'engluer dans notre atmosphère perdent leur vitesse, s'échauffent, et forment les belles étoiles filantes qui sillonnent le firmament à certaines époques de l'année, insectes du ciel qui ont brûlé leurs ailes à la flamme qu'ils ont eux-mêmes allumée.

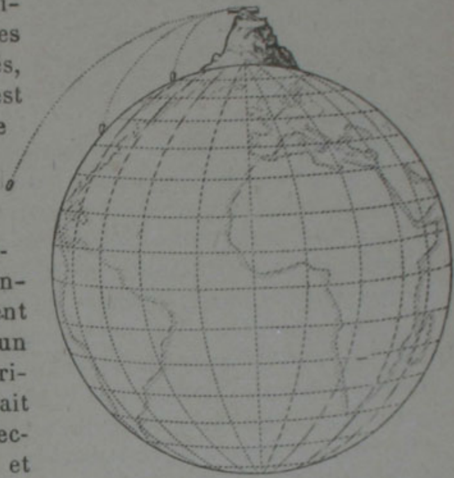


Fig. 23. — Un obus lancé avec une vitesse suffisante ferait le tour de la terre.

Mais, dira-t-on, la lune possède une vitesse bien inférieure à 8 kilomètres par seconde; cela est exact, mais aussi, elle est éloignée de la terre et, à la distance où elle se trouve, l'attraction que notre globe exerce sur elle est très affaiblie. L'accélération de sa chute est donc beaucoup moindre, et il lui faut une moindre vitesse pour y échapper. En calculant la force d'attraction que la terre exerce sur chaque particule de la lune, Newton a pu vérifier la loi d'attraction des masses, que Kepler avait déjà pressentie, mais qu'il n'avait pu entièrement formuler. Cette loi s'énonce dans les termes suivants : *La matière attire la matière en raison directe des masses et en raison inverse du carré de la distance.*

L'observation journalière ne semble pas confirmer cette attraction de la matière pour la matière. Nous ne voyons pas les maisons s'attirer; il est vrai qu'elles sont fortement fixées au sol; mais on ne voit pas davantage les billes de billard exercer une attraction mutuelle, et même certains joueurs novices peuvent penser qu'elles ont parfois une singulière tendance à se repousser. Sur la glace lisse d'un lac, on voit fréquemment les patineurs aller l'un vers l'autre : mais on a toujours pu expliquer cette attraction autrement que par une action des masses.

En réalité, l'attraction de la matière pour la matière est extraordinairement faible, et, pour la déceler sur de petites masses, il faut mettre en œuvre des procédés prodigieusement délicats. Il nous suffira, pour en donner une idée, de dire que deux kilogrammes situés à 1 mètre l'un de l'autre exercent une attraction réciproque à peu près égale à l'effort que produiraient sur le plateau d'une balance 6 millionièmes de milligramme. Ces deux kilogrammes, parfaitement libres de se mouvoir, se rapprocheraient, dans la première minute, de 1 dix-millième de millimètre.

C'est cependant à la mutuelle attraction que nous devons les mouvements des astres; mais chaque particule de la matière de l'un est attirée par toutes les parties de la matière de l'autre, et ainsi l'accumulation des efforts devient prodigieuse. La terre contient 5 000 millions de millions de millions de tonnes de matière, produisant l'attraction qui nous retient à sa surface. Les attractions sont d'ailleurs très variables d'un astre à l'autre, suivant les quantités de matière qui y sont rassemblées. 1 kilogramme transporté sur le soleil fléchirait un ressort 27 fois plus que sur la terre; à la surface de la lune, 6 fois moins. Si nous pouvions nous transporter sur ces deux astres et y vivre, nous serions écrasés, près du soleil, par une masse de 4 à 5 kilogrammes, tandis que, sur la lune, nous en porterions gaillardement 400 à 500.

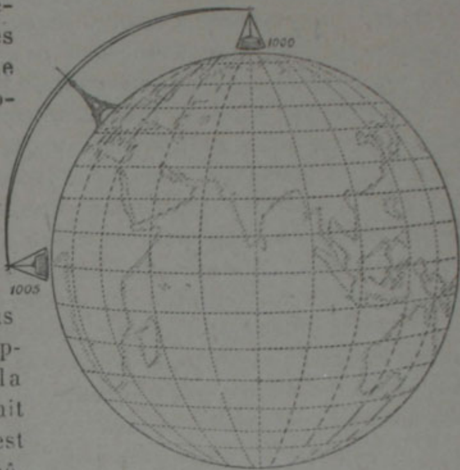


Fig. 24. — A l'équateur, une tonne pèse 5 kg de plus qu'au pôle.

Une expérience suffisante pour nous donner une idée approximative de la pesanteur nous avait montré qu'elle est sensiblement la même dans les diverses pièces d'une maison; des mesures d'une grande délicatesse, telles que peuvent les exécuter les savants, révèlent de petites différences. Ce n'est pas la balance qui les indique, car les poids placés dans les deux plateaux peuvent être considérés comme étant au même endroit. Mais, si nous avions une balance dont le fléau, de dix mille kilomètres de longueur, serait supporté par un pylône situé au 45° degré de latitude (fig. 24), de telle sorte que l'un des plateaux se trouve à l'équateur et l'autre au pôle, nous serions obligés, pour équilibrer une tonne mise dans le plateau polaire, d'ajouter 5 kilogrammes à une tonne placée dans le plateau équatorial.

En raison de cette différence d'attraction, une horloge réglée à Paris retarde, en Equateur, de 4 minutes par jour.

Très loin de tout corps céleste, le poids est insensible. Entre la terre et la lune, il existe un point où l'attraction des deux astres s'équilibre, et où un corps ne serait attiré dans aucune direction.

Le poids des objets est donc une qualité qu'ils peuvent perdre, tout comme nous perdons notre ombre sous un ciel uniformément gris; la pesanteur n'est pas en nous-mêmes, mais, comme l'ombre, dépend de ce qui nous entoure. Si donc nous définissons la quantité de matière par son poids, nous ne disons rien de précis.

Bien plus : si, pour des raisons de commodité, nous faisons peser sous nos yeux la matière que nous achetons, ce n'est pas (à moins que nous voulions écraser des pierres) son poids auquel nous attribuons une valeur quelconque. Nous achetons du pain pour sa valeur nutritive ; mais, s'il ne pesait rien, nous aurions d'autant moins de peine à le rapporter à la maison, et il n'en vaudrait que mieux.

Il est très important d'insister beaucoup sur cette différence fondamentale entre le poids et la masse, car la confusion de ces notions est fréquente, et entraîne de graves erreurs. Le poids peut augmenter, diminuer, disparaître même sans que la masse cesse de conserver exactement la même valeur.

Tout cela nous paraît parfaitement clair, et nous serions tentés de nous demander comment une confusion a pu naître ailleurs que dans l'esprit de personnes à qui tout est brumeux. Nous allons en comprendre la raison : le poids d'un corps est égal au produit de sa masse par l'accélération que lui communique la pesanteur. Or, comme son poids nous frappe plus souvent que sa masse, nous avons l'habitude de parler plutôt de celui-là. On le considère alors comme une propriété fondamentale, et on dit que la masse est égale au quotient du poids par l'accélération de la pesanteur.

Mais, puisque la pesanteur peut s'annuler, le quotient est alors celui de deux quantités nulles, c'est-à-dire une quantité indéterminée; et voilà comment la propriété la plus fondamentale des corps peut sembler s'évanouir en fumée si l'on n'y prend garde.

Si nous avions la possibilité de voyager loin de notre planète, jamais semblable définition n'aurait pu subsister; le poids d'un corps serait un accident comme sa couleur; définir la masse en partant du poids nous paraîtrait aussi artificiel que de définir l'écrevisse comme le fait un vieux dictionnaire de l'Académie : « Petit poisson rouge qui marche à reculons ».

Retenir en son esprit que la masse est le quotient du poids par l'accélération peut conduire à de singulières erreurs.

Il y a quelques années, un ingénieur qui n'avait gardé de la mécanique que les formules, développa la théorie suivante : Un ballon en équilibre dans l'air ne pèse rien; son poids étant nul, sa masse l'est aussi; s'il n'a pas de masse, son $mv^2/2$ est nul quelle que soit sa vitesse; un ballon dirigeable ne peut donc pas posséder d'énergie cinétique; il ne garde pas son élan, même pendant un temps infiniment court, et, si l'on veut entretenir son mouvement, il faut le faire démarrer constamment.

Il est vrai que, comme compensation, on devrait pouvoir le mettre en vitesse avec un effort nul. Mais l'ingénieur en question n'avait pas tiré cette dernière conclusion; il avait condamné le ballon dirigeable pour la première raison. Il ignorait évidemment que, de temps en temps, un ballon renverse une cheminée, ou casse une branche d'arbre.

28. — Les couples.

Nous sommes-nous jamais demandé pourquoi tournent les roues des voitures? Je parle des voitures attelées et non des automobiles. Le cheval tire sur le timon, l'effort se transmet aux essieux, qui entraînent les roues en avant; mais celles-ci reposent sur le sol, et nous avons vu qu'elles sont retenues en place par le frottement. Les deux forces AB, CD (fig. 25) ne sont pas directement opposées : elles passent l'une à côté de l'autre; l'une tire sur le moyeu, l'autre sur la jante. Et, toutes les fois qu'il en est ainsi, l'objet sur lequel les forces agissent se met à tourner.

On donne le nom de *couple* à l'ensemble de deux forces qui produisent une rotation, c'est-à-dire qui sont égales, parallèles, et de sens opposés.

Souvent on constitue un couple par des forces directement agissantes. Ainsi, lorsqu'on veut enfoncer un tire-bouchon, on saisit sa poignée entièrement dans la main, et on la fait tourner autour de sa tige verticale. On fait de même lorsqu'on ouvre une porte avec un bouton, ou une fenêtre au moyen d'une crémone.

D'autres fois aussi le couple s'établit automatiquement, par les mêmes actions qui réalisent l'équilibre des forces : la réaction de la matière et le frottement.

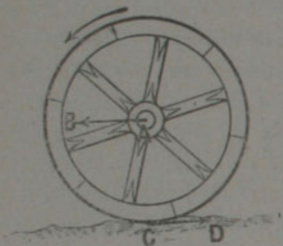


Fig. 25. — La roue d'une voiture tourne, parce qu'elle est sous l'action d'un couple.

A bicyclette, nous appuyons sur la pédale descendante, et laissons remonter l'autre; nous produisons cependant un mouvement de rotation. C'est que le palier [1] maintient en place l'axe de la manivelle, et crée la seconde force qui complète le couple.

Nous pouvons nous rendre compte aisément de la nécessité de cette seconde force. Piquons la pointe d'un vilebrequin dans une planche dure, et essayons de percer un trou. Aussi longtemps que la pointe ne sera pas suffisamment enfoncée, elle aura tendance à s'échapper, ce qui se passe très généralement pour les débutants; mais, quand le trou sera bien commencé, le vilebrequin s'y tiendra.

Il est facile de deviner ce qui fait l'efficacité d'un couple. Lorsque nous voulons fermer une porte, nous la poussons par la poignée de la serrure, non seulement pour ne pas risquer d'y marquer nos doigts, mais parce que nous savons qu'il faut agir le plus loin possible des gonds. Et si, de nous-mêmes, c'est-à-dire après des expériences dont nous avons perdu le souvenir, et dont le résultat reste à

1. Le mot palier possède un double sens; celui dans lequel il a été employé au § 8 est bien connu. Ici, il désigne le support d'un arbre tournant.

notre esprit inconscient, nous prenons les portes par leur bord opposé aux gonds, c'est que nous savons qu'ainsi nous ménageons notre effort. La porte tourne sans se déplacer latéralement, parce que les gonds complètent le couple, et nous comprenons maintenant que celui-ci est d'autant plus efficace que les forces sont plus éloignées; il n'est pas nécessaire de rappeler beaucoup d'expériences pour comprendre que la valeur du couple augmente éga-

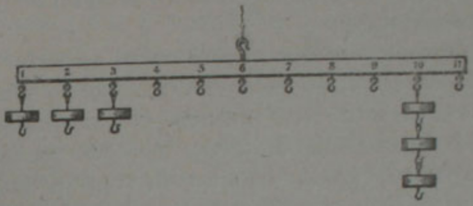


Fig. 26. — L'équilibre de la barre de bois peut être réalisé de bien des manières; il l'est toujours quand on oppose, en son point de suspension, des couples égaux.

lement avec les forces en jeu. Quelques mesures vont nous montrer comment la force et la distance s'associent pour caractériser l'efficacité d'un couple.

Vissons (fig. 26) au milieu d'une tringle de bois un piton, et, sur la face opposée, onze crochets équidistants, dont l'un sera exactement au-dessous du piton. Celui-ci étant suspendu à une ficelle, nous pourrons suspendre des poids aux crochets.

Le piton tirera alors de bas en haut, les crochets avec leurs poids, de haut en bas. Si nous chargeons un seul crochet, la barre s'incline, parce que le poids forme un couple avec l'effort qui la soutient. Mais, si nous suspendons deux poids égaux, par exemple aux crochets 2 et 10, la barre restera horizontale. Elle sera de même en équilibre si nous suspendons des poids égaux aux crochets 1, 2, 3, 9, 10, 11. Nous pouvons interpréter ce résultat de deux façons distinctes; nous pouvons dire d'abord : nos six forces se sont composées en une résultante unique, passant par le piton, et à laquelle fait équilibre la force exercée par la ficelle. Ou bien aussi : la moitié de cette force se combine en un couple avec les trois forces de droite, l'autre moitié avec les trois forces de gauche, de façon à engendrer deux couples égaux et opposés.

La première interprétation nous conduit à dire que deux forces égales et parallèles se composent en une résultante unique située au milieu de leur intervalle. Nous pouvons donc, sans changer l'équilibre de la barre, rassembler les poids de droite sous le crochet 10 et équilibrer trois couples par un couple unique.

Nous pouvons modifier encore notre expérience : suspendre au crochet 6 un poids égal aux précédents; de ces derniers, nous laisserons attachés aux crochets 2 et 10 deux poids égaux; nous ne changerons rien en composant les deux poids de gauche en un seul, et en les accrochant au crochet 4. Nous aurons alors suspendu à la barre un poids double de l'autre; celui-ci est deux fois plus loin du piton que le premier : ils se font encore équilibre. Nous pourrions répéter l'expérience de bien des façons, et nous trouverions que l'équilibre est *toujours* obtenu lorsque le produit de l'un des poids par sa distance au point de suspension est égal au produit semblable sur l'autre moitié de la barre. Et, plus généralement, nous verrions que, pour maintenir la barre horizontale, il faut réaliser l'égalité de la somme des produits à droite et à gauche.

Le principe de la composition des forces parallèles s'en déduit immédiatement. Nous voyons, de plus, que l'efficacité d'un couple est caractérisée par le produit des forces qui le composent et de la distance qui les sépare; c'est ce produit que l'on nomme le *moment* du couple; et les expériences que nous avons faites nous montrent qu'un système de couples est en équilibre toutes les fois que la somme des moments dextrogyres (tournant à droite) est égale à la somme des moments lévogyres (tournant à gauche).

29. — Le levier.

Depuis une haute antiquité, on a fait un usage probablement inconscient des principes que nous venons d'établir, pour augmenter les efforts qu'un homme peut exercer; on se servait dans ce but, et l'on se sert encore, d'un instrument que l'on nomme le *levier*, et qui consiste en une forte barre, généralement en fer ou en acier, que l'on engage sous le fardeau à soulever, que l'on appuie sur un support, et à l'autre extrémité de laquelle on exerce son effort. Si la distance de la charge au support est faible tandis que l'espace séparant ce dernier de la main qui actionne le levier est grand, l'effort est considérablement augmenté; il l'est toujours dans la proportion de ces deux intervalles, auxquels on donne le nom de *bras de levier.*

Le principe d'équilibre que nous avons établi peut dès lors être énoncé sous la forme suivante : *Un levier est en équilibre quand la somme des produits des efforts par leurs bras de levier est la même et de sens opposés des deux côtés du point d'appui.*

Souvenons-nous bien, lorsque nous ferons usage de ce principe, qu'un couple ne peut être tenu en équilibre que par un couple, et non par une force unique; pour que l'équilibre existe, il faut que les moments des deux couples soient égaux; mais ces couples peuvent être très diversement constitués : par une petite force agissant sur un grand bras de levier ou par une grande force agissant sur un petit bras de levier.

Si nos jeunes élèves ont bien compris, ils pourront défier leurs camarades au jeu suivant : on prend un marteau à son extrémité, de façon à ce que le manche repose sur le dos de l'index et soit retenu par l'intérieur du médius (fig. 27). S'ils rapprochent leurs doigts, ils ne parviendront pas, à moins d'être très forts, à maintenir le marteau horizontal; mais, plus ils éloigneront les doigts, plus la chose leur deviendra facile. Ils n'auront rien fait d'autre que d'éloigner les deux forces du couple empêchant le marteau de tourner. En pinçant le manche du marteau entre le pouce et l'index, ils ne l'auraient pas maintenu horizontal : et cependant ils le tiendraient vertical sans aucune difficulté; dans ce dernier cas, ils opposent une force à une force; dans le premier, ils cherchaient à faire équilibre à un couple par une force suffisante pour soutenir le poids du marteau, mais à laquelle s'ajoutait un couple beaucoup trop petit pour équilibrer le couple qu'engendre le marteau.

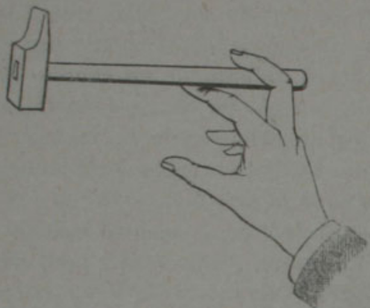


Fig. 27. — Pour équilibrer un couple, il faut lui opposer un couple de même moment.

La balance ordinaire compare des forces, en équilibrant l'un par l'autre des couples dont les bras de levier sont sensiblement égaux. S'ils le sont rigoureusement, l'égalité des couples entraîne l'égalité des forces, c'est-à-dire des poids; s'ils ne le sont qu'approximativement, l'équilibre de la balance indique que les poids ne sont qu'à peu près égaux.

Mais on peut faire une bonne pesée avec une balance fausse. Borda a indiqué qu'il suffit, pour cela, de mettre successivement les deux poids dans le même plateau, en équilibrant leur moment par celui d'un poids placé dans l'autre plateau, et dont on n'a pas besoin de connaître la valeur.

On peut aussi, suivant un procédé préconisé par Gauss, échanger les poids sur les plateaux; les deux pesées donnent toujours des résultats un peu différents; on en prend la moyenne, et le résultat est identique à ce qu'il serait si la balance était parfaite. C'est ce procédé qu'on emploie au Bureau international des Poids et Mesures et dans les établissements similaires, lorsqu'on veut faire des pesées très exactes.

Lorsqu'on peut se contenter de pesées peu précises, comme la grande majorité de celles du commerce, on admet que les balances sont suffisamment exactes, et on accepte leur petite erreur comme étant sans conséquence. Le service de la vérification veille à ce que les balances soient dans les limites des tolérances légales; il les contrôle, et fait réparer ou détruire celles qui sont fausses.

On peut aussi, fort honnêtement, fausser une balance, mais la fausser tellement qu'il serait impossible de s'y tromper. On fait, par exemple, l'un de ses bras dix fois plus long que l'autre; on met les poids sur le plateau supporté par ce dernier, et la charge sur le plateau opposé. Une charge de 100 kilogrammes sera alors pesée avec un poids de 10 kilogrammes, ce qui rend l'opération bien plus facile.

Fig. 28. — Le levier permet d'amplifier les mouvements.

Dans les gares, les balances sont le plus souvent à bras de levier variable, puisqu'au lieu de changer les poids, on glisse le long d'une tringle, au moins jusqu'à 100 kg., un poids qui reste toujours le même.

Ces exemples nous montrent toute la diversité des combinaisons que l'on peut réaliser avec les leviers, et dont chacune pourrait être une vérification de ses principes.

Le levier permet soit d'augmenter la force dont on dispose, soit de multiplier le chemin que décrit la force agissante; on le fait très aisément, en disposant quatre allumettes comme l'indique la figure 28; si l'on presse au point A, on voit l'extrémité de l'allumette B décrire un mouvement étendu, alors que celui du doigt est à peine perceptible.

Mais toutes les transformations des forces et des mouvements à l'aide des leviers sont soumises à un principe que connaissait déjà Archimède, et qui peut être énoncé en ces termes : *Ce que l'on gagne en force, on le perd en mouvement.* Le produit des forces par les déplacements est toujours le même, c'est-à-dire que le travail engendré par le déplacement d'une force n'est pas augmenté par le levier. Celui-ci augmente ou la force ou le mouvement, mais il ne crée pas le travail, il le transforme. C'est là un des aspects d'un principe que nous avons déjà rencontré (§ 23), et que nous retrouverons bientôt.

Les principes qui régissent le levier s'appliquent également aux engrenages, que l'on pourrait définir comme des *leviers continus*. Un engrenage, pas plus qu'un levier, ne crée du travail, au contraire il en absorbe toujours; c'est ce qu'oublient trop facilement les inventeurs de mouvements perpétuels.

30. — Le centre de gravité.

Une assiette posée trop près du bord d'une table risque de basculer, ce qui n'a jamais été salutaire à aucune assiette. Aussi chercherons-nous un autre objet pour l'expérience que nous allons faire : un livre, par exemple. Poussons ce livre tout doucement vers le bord de la table; au moment où il va basculer, retenons-le, et, nous servant du bord de la table comme d'une règle, marquons un trait de crayon sur sa couverture. Puis tournons le livre d'un certain angle, et recommençons l'expérience ainsi plusieurs fois. Nous aurons tracé une étoile de lignes droites, qui se couperont à peu près au même point; et, de quelque façon que le livre soit tourné, avec le grand ou le petit côté parallèle au bord de la table, ou avec un angle en avant, il tombera toujours lorsque le point de croisement des droites dépassera un tant soit peu le bord de la table. Il semble qu'une force soit toujours attelée à ce point, et, aussitôt qu'il n'est plus soutenu, fasse basculer le livre. Tirant à la règle les deux diagonales sur la couverture, nous verrons que ce point en occupe le milieu.

Nous pouvons faire la même série d'essais avec des morceaux de carton en forme de rectangle, de triangle ou de cercle. Chaque fois, nous retrouvons ce point qui marque la limite entre les positions stables et les positions instables.

Mais nous pouvons faire une autre expérience. Prenons l'un de nos cartons, le triangle par exemple, et suspendons-le successivement par ses trois angles; en même temps, nous appliquons contre lui une ficelle chargée d'une pierre, et qui passe exactement devant le point par lequel le triangle est pris. Cette ficelle passera également sur le point que nous avons marqué en faisant basculer notre carton. De plus en plus, il semble que tout le poids du carton soit concentré en ce point, puisqu'il se place de lui-même au-dessous de celui par lequel le triangle est suspendu. C'est pourquoi on le désigne sous le nom de *centre de gravité* du triangle, comme de tout corps quelconque.

Car tout corps possède un point doué de la même propriété; et, bien qu'on dise quelquefois d'une personne qui tombe, qu'elle a « perdu son centre de gravité », il ne faut voir là qu'une incorrection de langage, et non une exception à la règle. Si nous pouvions opérer avec une personne comme avec un morceau de carton, nous verrions bien que son centre de gravité ne l'abandonne jamais.

Quelques expériences faciles nous montreront que, sans nous en douter, nous utilisons constamment les propriétés de notre centre de gravité. Si, après avoir appuyé tout notre corps, du pied à l'épaule, contre une paroi verticale, nous voulons soulever le pied opposé, nous sentons que nous ne pouvons y réussir qu'au risque de tomber. Et, pour la première fois peut-être, nous nous rendons compte du fait que, pour soulever le pied gauche, nous nous penchons à droite.

Nous pouvons aussi, en nous penchant en avant, appuyer notre tête contre un mur, puis reculer nos pieds autant que possible. Nous serons alors incapables de nous relever sans l'aide de nos mains.

Revenons au triangle de carton : lorsque nous aurons déterminé son centre de gravité, nous pourrons piquer en cet endroit une aiguille à tricoter, que nous poserons sur nos deux index (fig. 29). Le triangle soutenu à l'endroit même où son poids est concentré tire directement sur l'aiguille et se tient indifféremment dans toutes les positions. Si, au contraire, l'aiguille est piquée plus ou moins loin de ce point, le triangle tourne jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessous d'elle. C'est qu'alors la force de sustentation de l'aiguille et le poids du corps ont formé un couple, et un couple produit toujours une rotation. Lorsque le centre de gravité est au-dessous de l'aiguille, celle-ci est dans la direction même marquée par la force qui représente le poids.

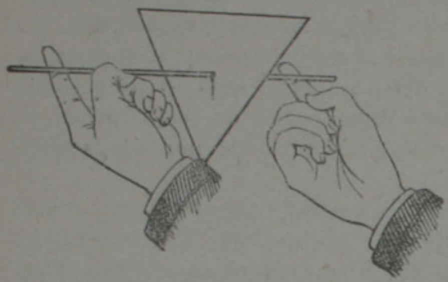


Fig. 29. — Un corps soutenu par son centre de gravité n'a aucune tendance à tourner de lui-même.

Les expériences que nous avons faites avec notre tringle de bois ne nous laissent aucun doute sur le rôle que joue le centre de gravité. Lorsqu'un corps est suspendu par ce point, on peut combiner deux à deux ses particules entre elles de manière à ce qu'elles exercent sur lui des couples égaux et de signes contraires. La résultante de toutes les forces de pesanteur agissant sur le corps passent toujours par ce point.

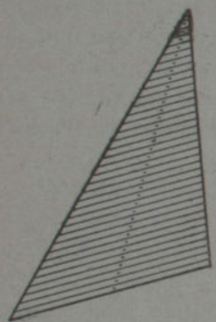


Fig. 30. — On peut souvent déterminer un centre de gravité par une opération géométrique.

Pour apprendre comment on peut déterminer le centre de gravité d'un corps sans aucune expérience, nous allons construire le centre de gravité d'un triangle; dans ce but, nous le découpons, par la pensée, en tranches parallèles à l'une de ses bases (fig. 30). Le centre de gravité de chacune d'elles sera en son milieu. Nous pourrions donc poser le triangle sur un couteau placé exactement au-dessous de l'une de ses médianes, il serait en équilibre; nous pourrions faire la même expérience pour les trois médianes; leur point d'intersection est le centre de gravité du triangle.

La notion du centre de gravité est tellement instinctive que le terme qui le désigne est souvent employé dans un sens imagé. On dit couramment, par exemple, que le centre de gravité d'une discussion s'est placé à un moment déterminé.

Puis le même problème se retrouve dans bien des domaines; c'est, par exemple, celui des échéances communes. Une personne doit verser certaines sommes à

Fig. 31 et 32. — La position du centre de gravité peut parfois nous surprendre.

diverses époques; elle veut se libérer en une seule fois sans avoir d'intérêts à payer. Elle pourrait figurer le temps sur une baguette rigide, suspendre au point représentant chaque échéance la somme d'argent qu'elle aura à payer ou un poids équivalent, et soulever la baguette en cherchant le point pour lequel elle reste horizontale. Ce point marque l'échéance commune, c'est-à-dire le *centre de gravité des diverses échéances*.

Terminons par quelques jouets : peut-on verser le contenu d'une bouteille tandis que le bouchon est sur le goulot? Rien de plus facile; piquons dans le bouchon deux fourchettes formant entre elles un angle assez aigu (fig. 31); le bouchon étant posé, le centre de gravité est toujours au-dessous du point de sustentation; le bouchon n'a donc aucune tendance à se renverser; il reste debout sur le col de la bouteille tandis qu'on penche celle-ci.

Voyons encore ce homard de carton qui repose sur une aiguille par la pointe de son bec (fig. 32); nous avons tellement l'instinct du rôle du centre de gravité, que nous sommes dans un profond étonnement de le voir se tenir sans tomber. Mais retournons-le : le camelot malin a collé deux petits plombs au bout de ses pattes, qui dépassent un peu sa tête; elles exercent, dans leur ensemble, un moment qui équilibre, par une force relativement grande au bout d'un petit bras de levier, la force beaucoup moindre agissant le long du levier qui va de la tête à la queue.

31. — La pression.

La connaissance que nous venons d'acquérir des effets des forces en équilibre nous permet d'aborder des questions nouvelles. Nous allons commencer par ce qu'on pourrait appeler la *répartition des forces.*

Lorsqu'à la montagne la neige tombe en abondance, la marche devient pénible et souvent dangereuse. On enfonce à chaque pas, et au lieu de pouvoir, comme sur un sol dur, pousser la jambe en avant, il faut la relever jusqu'à la surface de la neige, pour voir aussitôt le pied disparaître dans le trop moelleux tapis. Mais les montagnards savent s'outiller pour rendre leur marche plus facile; ils attachent à leurs pieds des raquettes, assez semblables à celles du tennis, avec le manche en moins, et dès lors n'enfoncent plus que très peu. La marche n'est plus alors pénible; elle est seulement fatigante.

Les montagnards ont peut-être inventé de toutes pièces la raquette; mais peut-être aussi ont-ils observé un animal particulièrement bien adapté à la marche dans la neige, le chien de montagne, qui a des pattes palmées; comme ce dernier, le chameau — le fait est classique, — dispose aussi d'une large surface portante, que la nature lui a octroyée. Dans un cas comme dans l'autre, la force a été répartie, disséminée pour ainsi dire, et il en est résulté des avantages certains.

Mais on peut aussi faire tout le contraire : rassembler la force sur un espace restreint et concentrer en même temps ses effets. La pointe que l'on fait aux clous n'a pas d'autre but; tandis qu'on munit de mouchets les fleurets, on affile les épées et on affute les couteaux ; on enlève aux uns leur puissance de pénétration en étalant la force qu'ils exercent, alors qu'on en donne aux autres en la concentrant. Lorsqu'on veut patiner sur la neige, on se munit de skis; pour la glace, au contraire, on chausse des patins à lame étroite et tranchante.

Pour étudier cette répartition des forces, que nous faisons sans cesse, il faut, suivant notre habitude, en donner une définition précise. Pour cela, nous considérons comme représentant cette répartition ou plutôt la concentration, qui n'est autre chose qu'une faible répartition, le quotient d'une force par la surface sur laquelle elle est répandue, et nous donnons à ce quotient le nom de *pression*. Une force répartie sur une surface de peu d'étendue engendre une forte pression et inversement.

En général, l'effort ne se répartit de façon parfaitement uniforme que dans les fluides — liquides ou gaz — qui, grâce à leur mobilité, peuvent s'échapper des endroits de forte pression, et se déplacer jusqu'à ce que chaque particule soit également pressée de tous côtés. Au contact des solides, au contraire, la pression est variable d'un endroit à un autre. Une boule posée sur un plan y pratique, comme nous l'avons vu, une petite dépression, dans laquelle se produisent des réactions d'autant plus fortes que la matière est plus déformée. La pression est maxima au centre de la cuvette, et va en diminuant jusqu'au bord, où elle devient insensiblement nulle.

Cependant on peut envisager, même dans les solides, une répartition uniforme de l'effort. Un fil de métal soumis à une traction résiste également en tous les points de sa section; la tige d'un piston ou d'un ascenseur est également soumise à une pression uniforme.

La considération des pressions dans les solides permet de généraliser plus que dans le cas des liquides. Si l'on en excepte des conditions très particulières, un liquide ne peut pas être soumis à une traction. Cette dernière, exercée sur un solide, sera considérée comme une pression négative, allant vers l'extérieur, tandis que la pression positive va vers l'intérieur. Toutes deux peuvent être exprimées par les mêmes nombres.

Nous avons acquis la notion de la pression en envisageant la répartition d'une force sur une surface. Mais la pression peut aussi être donnée directement; on en conclut la force en agglomérant le produit de la pression par les éléments de surface en une résultante unique. Le vent poussant une voile exerce une pression qui engendre une force, et l'on cherche, sauf lorsque le vent souffle trop fort, à la rendre aussi grande que possible, en augmentant la surface de voilure autant que le permet la stabilité du navire. Les locomotives ont des coupe-vent et les cyclistes coureurs se penchent sur leur guidon pour réduire la force due à la pression de l'air.

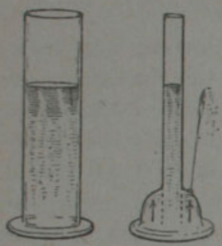


Fig. 33. — La pression sur le fond horizontal d'un vase est indépendante de la forme de ce dernier.

On peut ainsi, la force étant donnée, augmenter ou diminuer la pression, en diminuant ou augmentant les surfaces; la pression étant donnée, augmenter ou diminuer la force, en augmentant ou diminuant les surfaces.

La charge que porte le fond d'un vase cylindrique contenant un liquide (fig. 33) est évidemment égale au poids total du liquide. Mais nous pouvons, à une hauteur quelconque, étrangler le vase et le continuer en un tube cylindrique étroit. Si le liquide monte dans le tube à la même hauteur que dans le vase cylindrique, la petite portion du fond qui se trouve verticalement au-dessous du tube supportera encore le même effort que précédemment, car on pourrait supposer le tube prolongé jusqu'au fond, de manière à isoler une petite colonne liquide. Dans la réalité, c'est le liquide ambiant qui forme les parois de ce tube prolongé; et, au voisinage du fond, ce liquide est pressé comme le fond lui-même. Pour qu'il ne s'échappe pas, il faut que le liquide voisin le soutienne avec le même effort, et ainsi jusqu'aux parois et jusque sur toute la surface du fond. On pourrait faire le vase très plat, et le surmonter d'un tube très haut. Le fond serait alors soumis à un effort considérable, qui serait engendré par une très petite quantité de liquide. C'est là un fait rigoureux, mais si bizarre qu'on lui a donné le nom de *paradoxe hydrostatique*.

Mais, si ce fond du vase supporte un effort si considérable, ne devra-t-il pas être très lourd? et mis sur une balance, ne devra-t-il pas accuser un poids bien supérieur à celui du vase et du liquide réunis? Le fait serait plus que paradoxal, mais la difficulté se résout très simplement : le liquide pressé de tous les côtés est refoulé également contre le couvercle du vase, et le pousse de bas en haut à très peu près autant qu'il pousse le fond de haut en bas, à l'exception de la petite surface occupée par le tube. Si, en effet, le couvercle est percé d'un petit orifice, le liquide s'en échappe avec force.

On peut exprimer le fait qui précède en disant que la pression, en un point quelconque d'un liquide, ne dépend que de la hauteur de la colonne qui le surmonte, et nullement de sa section.

Dans les montagnes, quelque petites que soient les fissures, l'eau réussit à s'y insinuer, et, plus elle descend, plus elle se fraie facilement un chemin, car elle est pressée alors par toute la colonne d'eau qui la surmonte. C'est la raison pour laquelle le percement des tunnels de base, comme celui du Simplon, est si difficile. Lorsqu'une percée est dominée par une haute montagne, toutes les fissures que l'on coupe laissent échapper l'eau en un jet puissant, que l'on a beaucoup de peine à aveugler, et qu'on détourne dans une galerie de dégagement.

Puisque l'eau devient si pénétrante à de grandes profondeurs, ne devrait-elle pas disparaître tout entière dans le sol? La réponse est surprenante : Sous les très fortes pressions, les corps que nous considérons comme solides se mettent à couler comme des liquides. A une certaine profondeur, les roches terrestres forment donc un obstacle compact à l'écoulement des eaux, exactement comme si elles étaient elles-mêmes de l'eau pressée de toutes parts.

A l'intérieur des astres, les pressions deviennent formidables : des milliers ou même des millions de fois plus fortes que celles qui sont développées dans les canons par les gaz de la poudre. Nous n'avons aucune idée des actions que ces pressions peuvent exercer; mais il est certain qu'elles modifient considérablement les propriétés des corps. Elles peuvent produire des combinaisons et engendrer des corps nouveaux; ce sont probablement les fortes pressions de l'intérieur de notre globe qui sont la raison de l'existence de certaines espèces chimiques, et tout particulièrement de l'uranium et du radium.

Notre existence s'est adaptée à la pression qu'exerce l'atmosphère au fond de ce qu'on appelle l'océan aérien. Lorsque nous montons très haut dans l'atmosphère, et que la pression est beaucoup diminuée, nous éprouvons des malaises, qui se continuent par un évanouissement et même par la mort si la pression est trop réduite. Lorsqu'au contraire nous descendons dans une cloche à plongeur, la pression de l'eau s'ajoute à celle de l'atmosphère, et, à une quarantaine de mètres au-dessous du niveau de l'eau, elle devient à peu près insupportable.

En revanche, les poissons que l'on ramène des grands fonds sont très malheureux; leur vessie natatoire leur sort par la bouche, parce qu'étant moins comprimé, l'air qu'elle contient se détend librement.

Les hommes eux-mêmes sont obligés de prendre de grandes précautions quand ils ont été soumis à une pression un peu forte, comme l'exigent certains travaux de construction. Lorsqu'on veut poser les piles d'un pont, ou faire toute autre construction sur un fond recouvert par l'eau, on commence par immerger un caisson, c'est-à-dire une grande caisse de tôle épaisse, qui, au début, est naturellement remplie d'eau. Pour chasser celle-ci, on oppose à sa pression celle de l'air qu'on envoie au moyen de pompes à l'intérieur du caisson. Ensuite, des hommes y pénètrent, en se faisant écluser par une série de portes hermétiques, isolant de petits espaces qui peuvent s'ouvrir soit vers l'intérieur soit vers l'extérieur. A l'entrée dans le caisson, les hommes éprouvent un certain malaise, mais qui n'est nullement dangereux. A la sortie, au contraire, s'ils sont décomprimés rapidement, ils peuvent subir des accidents mortels.

L'explication en est la suivante : sous forte pression, le sang dissout une grande quantité d'oxygène, qui se sépare en bulles dans les vaisseaux lorsque la pression est brusquement diminuée. Ces bulles sont entraînées dans le torrent sanguin, et viennent jusqu'aux vaisseaux capillaires, d'où elles ne s'en vont plus, arrêtant ainsi le mouvement du sang. Aujourd'hui, ces accidents sont bien connus, et on n'a plus à les redouter, grâce aux précautions que l'on prend à la sortie des caissons.

Dans une bouteille de vin mousseux, le gaz est retenu dans le liquide par la pression; mais, dès qu'on débouche la bouteille, le gaz se dégage et pétille.

Un jour qu'un entrepreneur avait voulu fêter l'achèvement d'un travail, il offrit quelques bouteilles de champagne à ses ouvriers à l'intérieur d'un caisson. Or le vin moussait fort peu, et on put croire un instant qu'il avait perdu toute sa vertu. L'erreur ne fut pas de longue durée, car il la reprit dès que l'on revint à l'air libre. Mais il faut que chaque chose se produise en son temps et en son lieu. Le champagne était alors bien mal placé pour mousser; aussi les ouvriers se promirent-ils de n'en plus boire dans un caisson.

Encore une remarque en terminant : lorsqu'on introduit de la vapeur dans le cylindre d'un moteur, on y fait régner une pression, et, par le déplacement du piston, on engendre du travail. Ce travail est égal au produit du déplacement du piston par l'effort qu'il supporte, et qui est lui-même égal au produit de la pression par la surface du piston. Mais on peut, dans le calcul, se dispenser de l'intermédiaire de la force; on peut envisager seulement la pression et le volume dégagé dans le cylindre par le déplacement du piston. Le travail apparaît donc comme étant le produit d'une pression par le volume dont s'accroît l'espace où elle règne.

Cette même remarque nous conduit à formuler un principe que découvrit Pascal : si un réservoir rempli de fluide est muni de deux ouvertures inégales occupées par des pistons, on pourra, en enfonçant l'un, faire mouvoir l'autre. S'ils sont au même niveau moyen, ils subissent la même pression; comme ils déplacent le même volume de liquide, le travail que l'un introduit dans le réservoir, l'autre l'accomplit en s'en retirant, tout comme dans le cas du levier. Or, comme les chemins qu'ils parcourent sont inversement proportionnels à leur section, ils exercent des forces proportionnelles à ces dernières.

Tel est le principe de Pascal, sur lequel il a fondé lui-même la description d'une machine qu'il ne put construire en raison de difficultés purement matérielles, et qui ne fut réalisée qu'un siècle plus tard. Cette machine est la presse hydraulique, comprenant deux pistons qui ferment deux ouvertures inégales d'un même réservoir. Pressant sur le plus petit, on peut produire, au moyen du plus grand, des efforts très considérables. La presse hydraulique est beaucoup employée dans toutes les industries où l'on a besoin de comprimer fortement des matières, soit pour en exprimer les sucs (marcs de brasserie, etc.), soit pour en réduire le volume en vue de leur transport (foin, coton, etc.).

Nous appliquons aussi le principe de Pascal toutes les fois que nous gonflons les pneus d'une bicyclette; au prix d'un faible effort, nous refoulons de l'air, qui soutiendra plus tard notre poids par la surface de contact du caoutchouc avec le sol. Mais un effort modéré exercé par un corps de faibles dimensions refoule le caoutchouc, qui « boit l'obstacle », suivant la pittoresque expression d'un fabricant bien connu.

CHAPITRE VI

LE REPOS ET LE MOUVEMENT DES FORCES

32. — L'accélération virtuelle et l'accélération réelle.

Nous touchons maintenant à un point très délicat de notre étude, et nous devrons concentrer pour un moment toute notre attention si nous voulons découvrir le sens des expériences que nous allons faire.

Notre premier laboratoire sera le Métropolitain de Paris, dans une des heures malheureusement assez rares où il n'est pas trop encombré. Sans nous occuper de ce que pourront penser nos compagnons de route, nous marcherons d'un bon pas d'un bout à l'autre du wagon, et nous chercherons à analyser minutieusement nos sensations. Entre deux stations éloignées, nous pourrions ignorer que notre wagon est en marche; mais, dès que le train commencera à ralentir, nous ferons une observation singulière : le plancher du wagon nous semblera s'abaisser vers l'avant du train, de telle sorte que nous croirons descendre en marchant vers l'avant, et remonter vers l'arrière. Puis, pendant l'arrêt, le plancher deviendra horizontal, et, au départ, il s'inclinera en sens inverse. Ainsi, nous aurons été le jouet d'une illusion sur le sens de l'horizontale (ou de la verticale, comme on voudra), et nous pourrons nous demander si nous avons eu un moment d'hallucination, ou si notre erreur a son origine dans un fait mécanique.

Un objet inanimé, qu'aucune hallucination ne peut atteindre, nous répondra en toute sincérité.

Au risque d'étonner plus encore les voyageurs, nous suspendrons au plafond du wagon une boule, puis nous brûlerons la ficelle qui la supporte. Au repos, elle marquera le point du plancher qui se trouve verticalement au-dessous du point d'attache, et elle tombera encore sur ce même point lorsque le train marchera avec une vitesse constante. Mais, au moment de la mise en marche, la boule tombera en arrière de ce point, alors qu'elle s'en ira vers l'avant, au moment où l'on serre les freins.

En nous souvenant que les mouvements sont relatifs, nous nous expliquerons très simplement le sens de nos observations : si le fil de suspension est brûlé au moment précis où le wagon va se mettre en branle, la boule tombe verticalement; mais, comme le wagon transporte avec lui une verticale apparente, la boule tombe, en apparence, suivant une ligne inclinée; et c'est parce que le plancher du wagon n'est pas perpendiculaire à cette ligne de chute, qu'il nous paraît oblique par rapport au plan horizontal.

L'illusion que nous avons éprouvée est causée par un phénomène du même ordre; mais elle nous a appris un peu plus, car nous aurions pu deviner le résultat de notre expérience; notre première observation nous a montré que les deux accélérations, celle de la pesanteur et celle du mouvement, peuvent se combiner sans qu'il se produise une chute véritable; pour nous qui restons immobiles par rapport au plancher du wagon, et qui ne cédons pas à l'attraction de la terre, la même combinaison des accélérations se produit [1].

1. On a discuté pendant bien longtemps la cause du sentiment intime que nous avons de la verticale, et on a pensé la trouver dans les pressions hydrostatiques aux extrémités des trois canaux semi-circulaires de notre oreille interne qui, orientés dans trois plans rectangulaires, définissent un système complet de coordon-

Nous pouvons d'ailleurs nous procurer une image de cette déviation du plan horizontal; il suffit de disposer, dans un wagon, une cuvette contenant un liquide visqueux, de la glycérine par exemple. Dans les périodes d'accélération, sa surface prend une position inclinée. Nous avons tous fait mainte fois une observation analogue : lorsqu'un train entre en gare par temps de pluie, ses gouttières se vident par l'avant; au départ, l'eau s'en échappe par l'arrière; c'est que la surface de l'eau se relève à l'opposé de l'accélération. Ainsi, la déviation apparente du plan horizontal est reliée de la façon la plus simple au principe d'inertie, qui nous fournit, d'autre part, l'explication immédiate de notre dernière observation.

Pour abréger le langage, nous adopterons un terme particulier pour désigner une accélération qui se produirait volontiers, mais qui en est empêchée; nous l'appellerons l'*accélération virtuelle*. L'autre est naturellement une accélération réelle. Nous pourrons dès lors exprimer le résultat de notre observation en disant que *l'accélération réelle et l'accélération virtuelle s'exerçant simultanément sur une masse engendrent des forces qui se combinent en une résultante.*

33. — Le prix de l'accélération.

Les expériences que nous venons de faire nous montrent qu'il existe, dans l'effet des forces et dans les accélérations, un élément subtil auquel nous n'avions pas encore songé.

Courbons une baguette de saule, et attachons ses extrémités par une ficelle de manière à former un arc. En apparence, rien ne se passe dans l'ensemble; et, si nous ne

nées, pour l'invention duquel la nature aurait précédé Descartes d'un grand nombre de millénaires. Ces pressions se modifient suivant les diverses inclinaisons que nous pouvons donner à notre tête; mais aussi les accélérations des liquides contenus dans ces canaux engendrent des pressions dynamiques qui peuvent produire des perturbations de la verticale. Cette théorie, énoncée par M. de Cyon, devrait entraîner l'illusion de la verticale, même si nous restions assis dans le wagon. L'observation en a été faite par des personnes très attentives; mais elle est délicate.

savions pas que la forme d'une tige de saule n'est pas un arc de cercle, nous pourrions regarder indéfiniment la baguette et le fil sans nous douter qu'ils exercent l'un sur l'autre un effort. En réalité, et si l'on néglige la pesanteur, chaque extrémité de la baguette exerce sur le fil une force à laquelle ce dernier oppose une force égale; et, comme le fil est en repos, nous en concluons que l'effet des deux forces qui agissent sur lui s'annule, c'est-à-dire que ces deux forces sont égales et directement opposées. Mais, si nous coupons le fil, les forces cessent d'être opposées; la baguette se redresse brusquement, sous l'action de ses tensions internes. A l'instant précis où le fil est coupé, la force qui tend à redresser la baguette est égale à l'effort que le fil cesse précisément de supporter. Mais la force n'est pas annulée l'instant d'après; elle est employée en entier à redresser la baguette en lui donnant de la vitesse. C'est la masse de la baguette qui, en ce moment, absorbe le travail de la force en prenant une accélération.

De même, une pierre que l'on soutient exerce un effort sur son support. Que l'on vienne à retirer le support, l'effort tout entier qu'elle exerçait (la résistance de l'air étant négligée) est maintenant dépensé à lui donner une accélération constante.

Supposons que le support de la pierre soit une planche portée par un fil. Si nous coupons celui-ci, la planche tombera en même temps que la pierre; et, puisque toutes deux ont la même accélération, elles cesseront d'agir l'une sur l'autre. Si, en effet, la pierre pressait sur la planche, celle-ci serait soumise à une force supérieure à son poids, alors que la pierre subirait le même effort de bas en haut, et serait sollicitée vers la terre par une force moindre que son poids. La planche prendrait ainsi une vitesse supérieure à sa vitesse naturelle de chute, et la pierre une vitesse moindre. Elles se sépareraient donc immédiatement, et la force que nous avons supposé exister serait aussitôt annulée.

Les corps qui tombent en chute libre ne pèsent donc pas les uns sur les autres; et, si nous voyons une flèche lancée verticalement retomber toujours la pointe en bas, tirant manifestement sur ses pennes, c'est seulement parce qu'en raison de la résistance de l'air, celles-ci ne tombent pas en chute libre.

Qu'est donc devenu le poids d'un corps qui tombe? Il n'est pas perdu, mais il est employé en entier à accélérer son mouvement; comme chaque particule du corps exige l'action d'un effort constant pour garder l'accélération constante de sa chute, on retrouve, dans cette accélération, l'équivalent exact du poids de chaque particule. Ici, l'accélération est réelle, et la pesanteur est absorbée par le corps qui augmente sa vitesse. Lorsque le corps reposait sur son support, l'accélération était virtuelle; elle ne se produisait pas, mais se ramenait à une *tendance à l'accélération*, qui était le poids du corps.

L'analogie entre un corps entièrement supporté et la baguette de saule courbée par un fil est extrêmement étroite. Dans ce dernier cas, les diverses parties de l'arc et de la corde s'appuient les unes sur les autres, par pression ou traction, exactement comme s'appuient l'un sur l'autre le livre, la table, le plancher, la maison, le sol, pour s'opposer à la traction qu'exerce la pesanteur, et qui serait assimilable à l'effort qu'exerce la baguette.

Mais l'immobilité et la chute libre sont deux cas bien définis parmi l'infinité de ceux qui peuvent se produire.

Comme l'oiseau sur la branche, nous pouvons nous accroupir sur une bascule équilibrée, et nous relever brusquement; à ce moment, l'aiguille indiquera un poids très supérieur au nôtre, tout comme si nous nous étions laissé tomber sur le plateau. Glissant le poids le long du curseur, nous pourrons, après quelques tâtonnements, le placer à un endroit tel qu'il se relève juste au moment où nous donnons à notre corps la plus grande accélération. La différence entre ce poids marqué instantanément par la bascule et celui que nous pesons ordinairement indique l'effort que nous avons fait pour nous relever. Les plus vigoureux de nos jeunes amis, s'ils tentent l'expérience, auront, pendant un temps très court, l'illusion de peser dans les cent kilos.

Au début de la marche descendante d'un ascenseur de mine, la chute est très rapide et fortement accélérée; la charge des mineurs sur le plancher de la cage est alors très inférieure à leur poids, et la cage est loin d'exercer, sur le cable, un effort égal à son propre poids augmenté de son chargement. Au moment du freinage, au contraire, le mouvement est ralenti, ou, ce qui revient au même, le sens positif de l'accélération est ascendant. Les passagers exercent alors, sur le plancher, un effort supérieur à leur poids; et, si l'arrêt se faisait non par les freins mais par le cable, il serait soumis à des efforts qui pourraient entraîner sa rupture.

Il est facile d'imaginer un mécanisme par lequel la cage de l'ascenseur éprouverait, pendant une partie de sa chute, une accélération constante a, inférieure à celle de la chute libre. Soit m la masse d'un voyageur de l'ascenseur; l'effort absorbé pour lui donner son accélération est ma. L'effort qu'il exerce sur le plancher de la cage est égal à son poids, diminué de cet effort d'accélération. Il est donc égal à $m(g-a)$. Dans cette expression a, est l'accélération réelle, $g-a$, l'accélération virtuelle. La somme de ces deux accélérations est constamment égale à g.

Le poids réel d'un corps, c'est-à-dire l'effort qu'il exerce sur son support, est celui qui correspond à la partie virtuelle de son accélération. La partie de son poids produisant une accélération réelle n'est pas sensible à l'extérieur; c'est ce que nous pourrions appeler le *poids virtuel*. La somme du poids réel et du poids virtuel est constante [1]; sa valeur est celle du poids réel du corps, sur un support en repos ou animé d'une vitesse constante.

Nous discuterons, à propos du pendule, une expérience qui fixera ces faits dans notre mémoire (§ 40). Disons seulement qu'ils relèvent d'un principe général, formulé par d'Alembert, et auquel reste attaché le nom du grand encyclopédiste.

1. Cet énoncé n'est pas en contradiction avec le fait que le poids apparent d'un corps peut être supérieur à son poids réel; dans ce cas, son poids virtuel est négatif.

34. — L'accélération centripète et la force centrifuge.

Nous avons parfaitement compris qu'une masse à laquelle on impose une accélération se défend en exerçant un effort qui est le prix de sa mise en vitesse. Si nous partons d'un corps au repos, le problème se présente sous une forme unique; mais, si le corps est déjà en mouvement, la force peut agir soit dans la direction de ce mouvement, de manière à l'accélérer ou à le retarder, soit obliquement à ce mouvement. Dans ce dernier cas, qui est le plus fréquent puisqu'il est le plus général, la force peut être assimilée à l'ensemble de deux autres forces, dont l'une a la direction du mouvement lui-même (force tangentielle), tandis que l'autre lui est perpendiculaire (force radiale). La première produit une *accélération* positive ou négative, la seconde une *déviation*, que nous avons reconnu être une accélération de direction.

Si nous faisons tourner rapidement, à la manière d'une fronde, une boule attachée à une ficelle, cette dernière oblige la boule à se dévier constamment de sa route; elle lui imprime une *accélération centripète*; la boule, mauvaise tête, résiste et exerce sur la ficelle un effort du dedans au dehors, qui la tend d'autant plus fortement que la boule tourne plus vite. C'est cet effort que l'on nomme la *force centrifuge*.

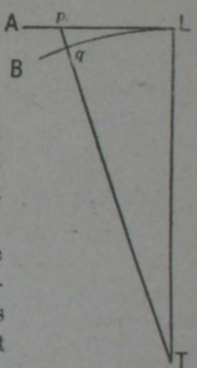


Fig. 34. — Comment est engendrée la force centrifuge.

Nous avons vu (§ 27) une semblable rotation s'accomplir, dans des dimensions immenses, par le mouvement des astres dans un système planétaire; et c'est en reprenant un problème précédemment effleuré, que nous arriverons à calculer la valeur de la force centrifuge.

Considérons, par exemple (fig. 34), la rotation de la lune autour de la terre. Si la lune était libre de se mouvoir, elle s'en irait en ligne droite, suivant le chemin LA; mais, en réalité, sa trajectoire s'infléchit vers

B. Si nous nous limitons à un temps très court, pendant lequel nous pouvons supposer que les droites joignant le centre de la lune au centre de la terre sont sensiblement parallèles, nous pourrons appliquer au mouvement de la lune les lois de la chute; si son accélération est a, le chemin qu'elle parcourra vers la terre sera $\frac{at^2}{2}$ au bout du temps t. D'autre part, la masse de la lune étant m, l'effort qui produit l'accélération supposée est ma.

Or le théorème de Pythagore nous permet d'écrire

$$\overline{TL}^2 + \overline{Lp}^2 = \overline{Tp}^2 = (\overline{TL} + \overline{pq})^2,$$

ou, en désignant par r la distance TL, par v la vitesse de a une

$$r^2 + (vt)^2 = \left(r + \frac{at^2}{2}\right)^2$$

Effectuant le calcul et supprimant r^2 dans chaque membre de l'équation, on trouve

$$v^2t^2 = rat^2 + \frac{a^2t^4}{2}.$$

Nous avons supposé le temps extrêmement court; le dernier terme du second membre contient donc un facteur extrêmement petit; on peut le négliger, et s'en tenir à l'équation

$$v^2t^2 = rat^2, \quad \text{ou} \quad v^2 = ra$$

Multipliant par m et divisant par r, on trouve

$$\frac{mv^2}{r} = ma = \text{force centrifuge}\ [1].$$

1. Ceux de nos lecteurs qui ne sont pas familiarisés avec les procédés du calcul infinitésimal pourront trouver que nous en prenons bien à notre aise en négligeant le dernier terme de l'équation; je tiens à les rassurer, en leur disant que le procédé employé ici est rigoureux, à la condition d'envisager des déplacements *infiniment petits*. Alors on peut, à la fois, considérer comme parallèles les droites convergeant vers T, et négliger le terme contenant une puissance supérieure de t. S'ils ont eu l'instant de doute que je suppose, ils seront heureux d'apprendre que les mathématiciens du XVIIe siècle eurent, à l'égard de la méthode infinitésimale, les mêmes scrupules, et n'ont commencé à lui

Nous avons considéré ici le cas de l'attraction luni-terrestre, afin de pouvoir utiliser les lois de la chute; mais nous aurions pu tout aussi bien remplacer cette attraction par l'action d'une ficelle, ou par celle d'un guidage quelconque, constitué par une courbe rigide. Le corps effectuant son mouvement curviligne aurait toujours exercé, sur l'organe qui lui impose cette contrainte, un effort dont la valeur est mesurée par l'expression que nous venons de trouver.

Il est bien entendu que, pour qu'une force centrifuge se développe, il n'est pas nécessaire que le corps tourne en rond : il suffit qu'il se dévie de sa route. Une petite portion de celle-ci pourra toujours être représentée par un arc de circonférence, et c'est le rayon de ce petit arc qu'il faudra assimiler à la quantité r inscrite dans la formule.

L'accélération centripète peut développer des efforts très considérables. Il n'est pas rare de lire dans les journaux que l'*explosion* d'un volant a causé de sérieux dégâts dans une usine, et a même entraîné la mort de quelques ouvriers. La grande vitesse donnée au volant avait alors produit un effort centrifuge qui en avait brisé la jante, et détaché, des rayons auxquels ils étaient attenants, ses morceaux qui avaient été projetés au loin.

C'est encore la force centrifuge qui est la cause de la plupart des accidents d'automobile dans les courses de vitesse. Dans les tournants abordés un peu court (avec une valeur faible de r), la voiture que l'on veut dévier de sa route tend à y persévérer; et, comme l'avant-train est tourné obliquement par rapport au chemin suivi jusque-là, les roues glissent latéralement et la voiture se renverse. Un rayon de sécurité étant trouvé pour une certaine vitesse, on devrait n'aborder les courbes à plus forte allure que si leur rayon croît comme le carré de la vitesse.

accorder leur confiance que lorsqu'ils eurent constaté que cette méthode conduisait à des résultats déjà découverts par d'autres procédés. C'est souvent ainsi que progresse l'esprit humain; il est rarement certain de ses plus récentes conquêtes. Plus tard, la foi vient avec le succès.

La force centrifuge oblige les cyclistes ou les chevaux de cirque à se pencher vers l'intérieur dans les tournants, de manière à ce que la résultante de la pesanteur et de la force radiale passe par la droite que définit leur centre de gravité et leur contact avec le sol. Mais, si cette droite est trop inclinée, l'adhérence au sol est insuffisante, et il se produit un dérapage. C'est pour l'éviter que l'on relève fortement les pistes dans les tournants. Ainsi, pour une certaine vitesse moyenne, les cyclistes restent perpendiculaires à la piste; les coureurs rapides sont plus penchés, les débutants le sont moins; si l'on s'engage sur des pistes très relevées avec une vitesse trop faible, on dérape vers l'intérieur.

Nous retrouvons ainsi, grâce à la combinaison de la force centrifuge et du poids des corps, la déviation de la verticale constatée déjà dans le démarrage ou l'arrêt d'un train; mais ici cette déviation se présente sous une forme nouvelle et plus aisément intelligible. Tandis que le démarrage ou l'arrêt n'a qu'une durée très limitée, et se produit au prix d'un changement de vitesse, la force centrifuge peut conserver indéfiniment la même valeur; elle fait partie d'un système stable; l'illusion de la verticale qu'elle nous donne peut durer aussi longtemps qu'on le veut, de telle sorte que nous avons tout le loisir de l'observer.

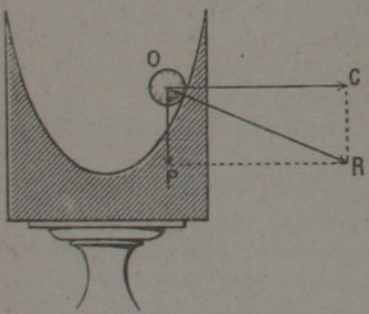


Fig 35. — Une bille est en équilibre à la surface d'un paraboloïde tournant à une vitesse convenable.

Si nous fixons, sur l'axe d'un tour vertical, un verre à moitié rempli d'eau, nous pouvons, en mettant le tour en marche, observer une curieuse dénivellation de la surface de l'eau, qui se creuse au centre et se relève sur les bords, d'autant plus que la vitesse de rotation est plus grande. La surface de l'eau est nécessairement perpendiculaire à la résultante de la force centrifuge et de la pesanteur en chaque point. Lorsque le verre tourne depuis un instant, la vitesse angulaire est la même dans toute la masse du liquide; alors la surface est un paraboloïde de révolution, qui est la forme engendrée par une parabole tournant autour de son axe.

Nous pouvons remplacer l'eau par de la cire fondue, et poursuivre l'expérience jusqu'à ce que le refroidissement l'ait solidifiée, puis poser sur la cire une bille (fig. 35), qui est dès lors soumise à un effort perpendiculaire à sa surface. Cette bille se trouve dans les mêmes conditions que si, en l'absence de tout mouvement, elle reposait sur un plan horizontal, car la pesanteur OP et la force centrifuge OC se combinent en une force unique OR, normale à la surface du paraboloïde. Si, maintenant, nous augmentons la vitesse de rotation, le paraboloïde formé par la surface de la cire est trop ouvert par rapport à la surface d'équilibre; celle-ci dessine un creux par rapport à la surface que nous avons matérialisée. Assimilant la première à un plan horizontal, nous reconnaîtrons que la cire forme comme un cône qui pointe sur le plan, et sur lequel la bille roule en allant vers l'extérieur. Le contraire se produit si la vitesse diminue; alors, le paraboloïde matériel est trop creux, et la bille roule au fond.

Un insecte posé sur la cire pourrait gravir les bords du creux ou descendre dans le fond, sans cesser de croire qu'il marche sur un plan horizontal; à vrai dire, il serait loin de se douter de l'intérêt que comporte cette expérience. Mais nous pourrions la répéter *in anima nobili*, et nous procurer de très curieuses sensations. Un ingénieur avait proposé, il y a quelques années, de construire une chambre bien close et de vastes dimensions, dont le plancher aurait la forme d'un paraboloïde, et à laquelle on donnerait un mouvement de rotation amenant ce dernier à être la surface d'équilibre. Les personnes se trouvant dans cette chambre auraient pu alors marcher dans tous les sens et grimper aux murs sans avoir la moindre idée de leur direction par rapport à la verticale extérieure; en se regardant entre elles, elles se seraient crues transportées dans le royaume des mouches.

Une autre particularité d'une semblable expérience ne pourrait pas nous échapper, même si nous marchions les yeux fermés : nous nous sentirions très lourds; nous soulèverions nos pieds avec peine, et nous croirions avoir des poids suspendus aux mains. C'est que la résultante de la force centrifuge et de la force de pesanteur est plus grande que cette dernière; chaque parcelle de notre corps est poussée vers la surface du paraboloïde plus fortement qu'elle n'est attirée vers la terre à tout autre moment. Puis d'autres malaises pourraient survenir au bout d'un instant : notre charpente soutenant les parties solides de notre corps mais laissant les liquides libres de se mouvoir, nous sentirions bientôt un peu de vide au cerveau, alors que nos pieds et nos mains se congestionneraient, nous faisant éprouver une sensation que nous pouvons nous procurer aisément en imitant, avec nos bras, le mouvement des ailes d'un moulin. Les personnes affligées du froid aux pieds trouveraient une petite compensation à leur malaise; mais il ne faudrait pas prolonger trop l'expérience, sous peine de risquer des évanouissements.

Les skieurs connaissent bien cette sensation particulière de vide au cerveau, qui se produit lorsque, lancés à toute allure, ils décrivent un arc de cercle. Fortement penchés à l'intérieur de la courbe, ils creusent un sillon profond dans la neige, en même temps que chaque parcelle de leur corps est fortement poussée vers les pieds. Généralement, la courbe est le prélude d'un arrêt; si ce mouvement devait durer, on ne manquerait pas d'en ressentir d'assez graves inconvénients.

La force centrifuge est utilisée, dans les laboratoires ou les usines, pour effectuer des séparations de corps de densités différentes, qui se trouvent, tandis qu'ils sont en rotation, dans les mêmes conditions que si le poids de chaque parcelle était considérablement augmenté. Les différences sont multipliées dans la même proportion, et les parties les plus denses sont rapidement entraînées à l'extérieur. C'est ainsi que l'on sépare le sérum des autres constituants du sang, le beurre du lait, etc. Et ce procédé est si courant que l'on peut voir, dans quelques villes allemandes ou suisses, annoncer du *Centrifugal-Butter*, ce qui signifie du *beurre centrifuge*; si l'on n'était renseigné, on pourrait penser que ce beurre a une tendance particulière à s'enfuir du centre du consommateur. Nous dirions : *beurre centrifugé*, ce qui lèverait toute incertitude.

La force centrifuge produit de très curieux effets de tension des corps qui sont soumis à son action. On peut mettre en rotation rapide une feuille de papier ou un morceau d'étoffe, et lui donner une rigidité très notable. La feuille de papier peut servir à scier du bois; le morceau d'étoffe, lorsqu'on le frappe latéralement, vibre comme une plaque de métal.

La force centrifuge se traduit, dans la nature, par des effets grandioses. Le Maëlström, le célèbre tourbillon des îles Lofoten, auquel on a fait une si méchante réputation, n'a pas d'autre cause. A la marée montante, la mer s'engouffre entre deux îles, et les courants, venus des extrémités de l'étroit couloir qu'elles interceptent, se rencontrent obliquement, et se mettent à tournoyer autour de leur surface de séparation. Il en résulte une dépression de la surface, dans laquelle les barques peuvent être entraînées. Lorsque la mer est étale, le tourbillon se calme, pour reprendre au flux suivant.

C'est aussi la force centrifuge qui, lors de la formation de notre système solaire, a détaché les anneaux dont la condensation a formé les planètes : c'est donc à cette force bienfaisante que nous devons la bonne terre qui nous porte, et qui, de son côté, conserve la marque indélébile de l'action due à sa propre rotation. Elle est aplatie aux pôles, renflée vers l'équateur, parce que la matière est rejetée vers l'extérieur. Le diamètre polaire de la Terre est ainsi de 42 kilomètres environ plus petit que le diamètre équatorial (§ 27).

Revenons à notre point de départ. A bien des personnes, la force centrifuge apparaît comme entourée d'un certain mystère, sinon dans ses effets, du moins dans ses causes; c'est pour elles une force spéciale, bien distincte des autres, et qui nécessite, pour être comprise, des éclaircissements tout particuliers. Nous savons maintenant qu'il n'en est rien : la force centrifuge est la conséquence nécessaire et immédiate de l'accélération centripète, ou, plus généralement, de l'*accélération de direction*; elle est une conséquence également nécessaire de l'inertie, cette propriété de la matière que l'on peut tout aussi bien définir en disant que les masses ne modifient leur mouvement que sous l'action des forces (§ 13).

35. — Percussion centrale ou excentrique; les centres réciproques.

Une bille de billard frappée au centre roule droit devant elle; en tête, elle est très allante; au bas, elle a tendance à reculer; à droite ou à gauche, elle dévie; et si nous en cherchons la cause en regardant attentivement le mouvement de la bille, nous reconnaissons que, tout en la poussant en avant, nous lui avons donné un mouvement de rotation, comme si les parties les plus éloignées du point de contact avaient eu une tendance à la retenir en place.

Ce que nous savons déjà va nous permettre d'expliquer cette observation : toute accélération donnée à une masse développe une réaction qui en est le prix; toutes ces réactions, liées dans un même corps solide par la cohésion de ses parties, se composent entre elles, et constituent soit une force, soit un couple.

Supposons d'abord que nous communiquions à toutes les particules des accélérations parallèles et de même valeur; il en résultera tout un ensemble de forces parallèles, proportionnelles à la masse de chaque partie, et tout à fait analogues à celles que produit l'accélération *virtuelle* de la pesanteur. Elles se composent donc de la même façon, c'est-à-dire en une force unique passant par le centre de gravité du corps frappé.

Réciproquement, si nous frappons un corps droit contre son centre de gravité, nous communiquons à toutes ses parties, grâce à leur solidarité, des accélérations de même valeur; le corps recule en bloc, parallèlement à lui-même, sans aucune rotation. Si, au contraire, nous le frappons excentriquement, il ne pourra pas effectuer un mouvement parallèle. Supposons, en effet, qu'il recule parallèlement; son mouvement développera une force passant par son centre de gravité, et qui, composée avec la poussée, constituera un couple obligeant le corps à tourner sur lui-même.

Nous voyons donc naître une relation tout à fait singulière entre un phénomène de repos et un phénomène de mouvement. Le centre de gravité, que nous avons appris à connaître comme centre des efforts de la pesanteur, se retrouve identique comme centre des efforts de réaction de la matière à laquelle on communique une accélération réelle; et la raison pour laquelle ces deux points coïncident dans un même corps se trouve dans la parenté très intime des accélérations réelles avec les accélérations virtuelles. Cette identité des deux centres possède un sens profond, sur lequel on n'insiste pas toujours assez.

Plus nous frappons un corps loin de son centre de gravité, plus il tourne sur lui-même en même temps qu'il recule. Au voisinage du point frappé, le recul est considérable; et, en vertu de la rotation qui s'ajoute au mouvement de translation, si l'on s'éloigne encore du centre de gravité, on rencontrera des particules qui reculeront davantage; mais, en marchant vers le centre de gravité, on trouvera des déplacements moindres, et on pourra atteindre des régions où le mouvement de rotation compensera le mouvement de translation, et arrivera même à le dépasser; ces parties du corps frappé viendront en avant.

Nous étudierions bien facilement tous ces mouvements si nous étions en un lieu de l'espace où la pesanteur est sans action; nous pourrons nous en rendre un compte approché en frappant horizontalement, en divers points, un bâton flottant sur l'eau. Nous pourrons aussi suspendre un bâton à une ficelle, et le frapper d'abord à son extrémité inférieure, puis de plus en plus haut. Nous verrons ainsi le bâton reculer en bloc où tourner sur lui-même.

En poursuivant systématiquement cette expérience, nous découvrirons une relation très intéressante : la canne étant suspendue en un point A quelconque, nous trouverons, en la frappant de plus en plus haut, le point de choc B pour lequel la ficelle n'est chassée ni en avant ni en arrière, c'est-à-dire le point où le mouvement de recul est exactement compensé par la rotation. Les points A et B sont réciproques l'un de l'autre, en ce sens que si, frappant B, A reste immobile, de même B ne se déplace pas lorsqu'on frappe A.

Cette propriété des corps soumis à des chocs est très utile à connaître par tous ceux dont le métier est de frapper : forgerons, ou tous ceux qui manient le marteau. Au moment où celui-ci frappe la pièce de forge, il reçoit un choc réciproque et rebondit. Si le forgeron le tenait très près de la tête, il recevrait à la main une secousse fort désagréable; mais il a soin de saisir le manche près de son extrémité, au voisinage du point qui reste immobile. D'ailleurs, l'expérience de bien des générations de forgerons a précédé l'éducation de ceux d'aujourd'hui; le marteau a été constitué de manière à mettre le centre réciproque en un endroit du manche commode à saisir. La tâche du forgeron est donc simplifiée; mais il n'est pas un apprenti qui n'ait appris à ses dépens comment il faut tenir un marteau.

36. — Le moment d'inertie.

Si nous saisissons un fleuret par sa poignée, nous fouetterons sans grand'peine; si, au contraire, nous le prenons par l'extrémité de la lame, nous aurons le sentiment que nous la fausserions si nous voulions donner à la poignée, éloignée de la main, un mouvement rapide; et nous comprenons, sans avoir à réfléchir beaucoup, que toute la différence réside dans le fait que, dans le premier cas, les plus grosses masses sont dans notre main, tandis que, dans l'autre, elles en sont éloignées.

Supposons que nous voulions mettre un volant en mouvement; l'effort de notre main composera, avec le palier, un couple engendrant une rotation. Mais, en même temps, chacune des masses qui éprouve une accélération exerce un couple de réaction, et tous ces couples se composent en un couple unique, égal à celui que nous produisons.

L'accélération de chaque masse est proportionnelle à sa distance à l'axe de rotation; le moment du couple qu'elle forme est égal au produit de la réaction par son bras de levier; la résistance au mouvement sera donc, pour chaque masse, proportionnelle au carré de sa distance à l'axe.

Faisons la somme de tous les couples résistants, nous aurons le couple résistant total du volant. Ce couple est constitué par le produit de deux quantités distinctes : l'une est inhérente au volant, l'autre dépend de son accélération angulaire. Ce qui est invariablement lié au volant, c'est le *produit de chaque masse par le carré de sa distance à l'axe de rotation*. On appelle la somme de ces produits le *moment d'inertie du volant*.

Pour la simplicité des calculs, on remplace tous les produits partiels qui constituent le moment d'inertie par un produit unique, celui de la masse du volant par le carré d'une longueur telle que ce produit soit égal à la valeur du moment d'inertie. Cette longueur est ce qu'on nomme le *rayon de giration* du volant. Si ce dernier était réduit à un anneau très mince tournant autour d'un axe passant par son centre et perpendiculaire à son plan, le rayon de giration serait égal à celui de l'anneau. Pour un disque plein, la matière intérieure à un anneau infiniment mince possède un moment de réaction moindre que celui de ce dernier. Si donc on veut utiliser la matière le mieux possible pour donner à un volant un grand moment d'inertie, il faut la pousser à la périphérie.

Supposons deux volants de même matière et de forme semblable, mais dont l'un soit deux fois plus grand que l'autre. Sa masse sera 8 fois plus forte et le carré de son rayon de giration 4 fois. Son moment d'inertie sera donc égal à 32 fois celui du premier; plus généralement, n^5 fois si le rapport des dimensions est n. Cette simple remarque nous montre qu'on ne peut pas, sans en examiner toutes les conséquences, copier une machine sur une plus petite. C'est dans de semblables raisons que gît la difficulté, aujourd'hui vaincue par des merveilles de mécanique, de construire des machines volantes adaptées à la taille de l'homme.

Tout comme une masse isolée dont on modifie la vitesse de translation, les masses associées dans un volant absorbent et restituent le travail des forces ou des couples employés à leur donner un mouvement de rotation; les volants sont les magasins de travail, dans lesquels on serre le superflu d'un instant, que l'on reprend l'instant d'après. Ainsi, les moteurs à explosion, qui donnent un choc assez brusque au piston, possèdent par moments une très grande puissance, alors que, dans d'autres, ils n'en ont aucune; or les outils qu'ils alimentent ont besoin de consommer constamment une puissance ne variant qu'entre d'étroites limites. C'est le volant qui est chargé d'apporter à la marche d'un moteur la régularité nécessaire; il absorbe les excédents de puissance en augmentant un peu sa vitesse, et les restitue en la diminuant légèrement.

Les volants sont également très précieux lorsque, au contraire de l'exemple précédent, l'utilisation du travail est variable. Une scie circulaire, par exemple, absorbe une grande puissance tant qu'elle travaille; le son descendant que produit le choc des dents avec la planche qu'elle débite montre en effet que ces chocs s'espacent de plus en plus; puis, pendant que la scie tourne à vide, le moteur rend au volant la vitesse perdue, pour le préparer à une nouvelle tâche.

De même, toutes les fois qu'un convoi (tramway, train électrique) démarre, il fait un emprunt considérable de puissance à la canalisation électrique par laquelle ses moteurs sont alimentés. C'est encore le volant de la station centrale qui fournit, en perdant un peu de sa vitesse, l'énergie nécessaire à l'accélération du convoi; il la reprend ensuite, dans l'intervalle de deux démarrages.

Considérons un volant formé par un anneau d'épaisseur infime. Lorsqu'il tourne, son énergie cinétique est égale à $mv^2/2$; or sa vitesse périphérique est égale au produit $r\omega$ de son rayon par sa vitesse angulaire. Son énergie est donc exprimée par $mr^2\omega^2/2$. Mais mr^2 est son moment d'inertie; on en conclut que l'*énergie cinétique d'un volant est égale au demi-produit de son moment d'inertie par le carré de sa vitesse angulaire.*

Les notions élémentaires de mécanique sont tellement entrées dans notre esprit que nous parlons couramment aujourd'hui d'un volant comme d'un *régulateur* dans n'importe quel domaine. Dans les ateliers, certaines commandes dont on peut différer la livraison constituent un *volant de travail*; on les entreprend lorsque l'atelier chôme, et on les abandonne lorsqu'il est surchargé de commandes urgentes. Tout comme les volants proprement dits, elles parent aux à-coups, c'est-à-dire à la surchage ou à la marche à vide.

CHAPITRE VII

LES MOUVEMENTS OSCILLATOIRES

37. — Forces périodiques et oscillations.

Dans le monde naturel comme dans le monde artificiel, les mouvements de va-et-vient possèdent une importance extrême : depuis l'aile du moucheron, produisant à notre oreille le bruit strident précurseur d'une piqûre, jusqu'au flux et au reflux de la mer, une foule de mobiles vont et viennent, *oscillent* entre deux limites qu'ils ne franchissent pas. Le diapason ou la corde vibrante exécutent, tout comme l'air qui nous transmet le son, un mouvement oscillatoire; le pendule des horloges et le balancier des montres, le navire à l'ancre battu par le flot, les vagues elles-mêmes se balancent de droite à gauche ou de haut en bas, tout en gardant une position moyenne par laquelle ils repassent sans cesse.

Cette position moyenne est, en général, la position d'équilibre stable du mobile, celle dans laquelle il se fixerait si aucune cause extérieure ne l'obligeait à l'abandonner; mais, dès qu'on l'en écarte, des efforts prennent naissance et augmentent à mesure que le mobile est plus éloigné de sa position d'équilibre, vers laquelle elles tendent à le ramener. Une accélération se manifeste donc; le corps prend une vitesse croissante, jusqu'à son passage par la position d'équilibre; dès qu'il la dépasse, les forces antagonistes retardent sa marche; et, lorsque toute l'énergie cinétique a été épuisée par l'action des forces, le corps s'arrête et revient en arrière. Le mouvement continuerait ainsi indéfiniment si les forces antagonistes possédaient toujours les mêmes valeurs aux mêmes points à l'aller et au retour, car il y aurait un échange constant de travail et d'énergie cinétique.

Nous savons que, dans la réalité, il n'en est pas toujours ainsi : un diapason donne un son de moins en moins intense, et se tait complètement; le pendule d'une horloge que l'on a négligé de remonter s'arrête au bout de quelques minutes ou de quelques heures, suivant la perfection de sa construction, par l'effet des forces de frottement, qui agissent toujours dans le sens de l'arrêt, consomment le travail et n'en fournissent jamais.

38. — Image du mouvement oscillatoire.

Nous pouvons, au prix d'un petit effort d'attention, nous faire une idée plus précise des conditions dans lesquelles s'effectue un mouvement oscillatoire.

Cherchons d'abord à nous en procurer une image. Nous avons étudié, dans le chapitre consacré au mouvement, le déplacement apparent d'une lumière tournant dans un cercle (§ 12). Reprenons-le avec plus de détail.

Après avoir couché notre bicyclette sur une table, nous pouvons coller un petit morceau de papier sur l'une des roues; puis, l'ayant mise en rotation, aller nous asseoir à quelques mètres de distance, de manière à voir la roue exactement par la tranche. Si nous fermons un œil, afin de perdre la sensation du relief, et si nous concentrons toute notre attention sur le mouvement du papier, nous le verrons seulement se déplacer de droite à gauche et de gauche à droite, rapidement au milieu de sa course, lentement vers les extrémités. Nous pourrons ignorer que le papier tourne en rond, et nous figurer qu'il se déplace sur une droite perpendiculaire à la direction de notre vision.

Si maintenant, nous dessinons (fig. 36) ce que nous venons de voir, nous saurons par exemple que, lorsque le papier est en P, nous nous imaginons le voir en P′, à l'intersection de notre rayon visuel avec le diamètre de la roue qui lui est perpendiculaire. Lorsque le papier va de P à Q, nous suivons son mouvement de P′ à Q′. Sa vitesse est donc réduite, pour nous, dans le rapport $\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{PR}{PQ}$.

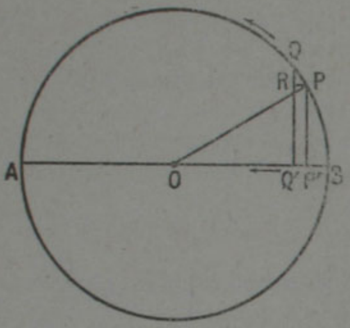


Fig. 36. — La rotation est une image du mouvement oscillatoire.

Or, si l'arc PQ est très petit, il peut être assimilé à un fragment de droite. Les triangles PQR et POP′ étant semblables, on voit que la vitesse est réduite dans le rapport de PP′ au rayon de la circonférence. On peut donc dire que, si le mouvement du point est représenté par le déplacement de P′, sa vitesse est donnée, à une échelle convenablement choisie, par sa distance au diamètre AB.

Mais cette vitesse apparente se modifie sans cesse. De P à Q, elle a varié de la quantité RQ. La similitude des triangles déjà considérés nous montre que cette variation de la vitesse, qui est l'accélération apparente du point P, est, au mouvement, dans le rapport $\frac{RQ}{PQ} = \frac{OP'}{OP}$.

Si nous prenons maintenant OB comme la mesure de la plus grande accélération, la distance OP′ représentera toujours la valeur de l'accélération du mouvement au point P′.

Il ne nous reste plus qu'à faire une convention sur le signe des quantités; nous nous conformerons à un usage général, en comptant positivement les distances à la droite de O, négativement à la gauche. De plus, les vitesses et les accélérations seront positives lorsqu'elles iront vers la droite. Dans le mouvement que nous étudions, la vitesse sera donc négative, ainsi que l'accélération, à l'endroit où se trouve P′, étant donné le sens du mouvement de P. Il est utile que ces indications soient bien comprises.

39. — Les lois des mouvements oscillatoires.

Nous venons d'étudier les conditions purement cinématiques du problème. Nous allons maintenant l'envisager dans le sens de la dynamique.

Supposons donc qu'une masse, qui n'est soumise à aucune force lorsqu'elle est au point O (fig. 37), soit, dès qu'elle s'en écarte, ramenée vers ce point par une force proportionnelle à son éloignement. Nous pourrons représenter cette force, au point E par exemple, comme en tout autre, par la distance ED de la droite OC à la droite AB dans laquelle se meut le point considéré.

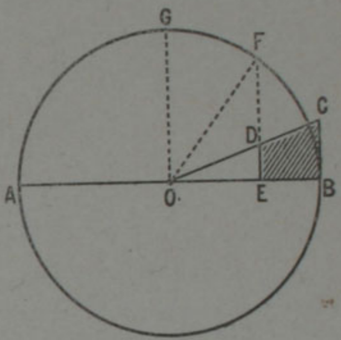


Fig. 37. — Une masse soumise à une force de rappel exécute un mouvement oscillatoire.

Écartons d'abord la masse jusqu'en B, et abandonnons-la sans vitesse. Elle sera ramenée vers O, et, en tout point de sa course, son accélération sera proportionnelle à l'ordonnée de la droite OC; ou, en raison de la similitude des triangles, proportionnelle à la distance au point O.

Il nous est facile de calculer la vitesse atteinte par la masse en chaque point.

Le travail absorbé par la masse m étant le produit de la force par le chemin parcouru, le mouvement de B en E absorbera un travail égal à la somme des produits d'une série de petits déplacements par une série de forces représentées par les ordonnées du trapèze BEDC, soit, au total, par la surface s de ce trapèze. Posons $OB = r$,

$OE = x$, $BC = k$. Nous aurons d'abord : $ED = k\frac{x}{r}$, puis

$$s = OBC - OED = \frac{1}{2}rk - \frac{1}{2}xk\frac{x}{r}.$$

Si nous posons $\frac{k}{r} = \alpha$, une transformation immédiate nous donnera

$$s = \frac{\alpha}{2}(r^2 - x^2).$$

Cette superficie s est égale d'autre part (§ 21) à $\frac{mv^2}{2}$, c'est-à-dire à l'énergie cinétique de la masse m, dont la vitesse en E est égale à v. On a, par conséquent, l'équation

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{\alpha}{2}(r^2 - x^2)$$

d'où l'on tire

$$v = \sqrt{\frac{\alpha}{m}}\sqrt{r^2 - x^2}.$$

Traçons une circonférence sur AB. En fixant convenablement l'échelle des vitesses, c'est-à-dire en admettant que la plus grande vitesse du point oscillant soit représentée par OG, la vitesse en E sera donnée par EF.

Nous retrouvons donc toutes les particularités du précédent diagramme, et cette complète analogie nous permet d'énoncer le théorème suivant, qui joue, dans toute la théorie des mouvements oscillatoires, un rôle important : *Si une masse est ramenée vers sa position d'équilibre par une force proportionnelle à sa distance à ce point, la position de cette masse est représentée par la projection, sur la direction de la force, d'un point décrivant, d'un mouvement uniforme, une circonférence tracée sur la plus grande élongation du mouvement de la masse; la vitesse est représentée par la hauteur de ce point au-dessus de l'axe de la force; son accélération enfin, par la distance de sa projection au point d'équilibre.*

Il nous reste encore à trouver une relation fondamentale.

L'énergie emmagasinée dans la masse en mouvement, au moment où elle passe par sa position d'équilibre, est représentée par la superficie de tout le triangle OBC; elle est donc proportionnelle au carré de OB. Cette énergie étant aussi proportionnelle au carré de la vitesse de la masse en O, cette vitesse est proportionnelle à OB. Si donc, au lieu d'écarter le mobile jusqu'en B, nous l'amenons seulement jusqu'en E pour le lâcher ensuite, il oscillera de telle manière que le point figuratif de son mouvement décrira, à la même échelle que précédemment, une circonférence de rayon OE. La vitesse étant proportionnelle au rayon, la durée de la révolution sera toujours la même. Il en résulte ce fait d'une grande importance : *Lorsqu'une masse est ramenée vers sa position d'équilibre par une force proportionnelle à sa distance à cette position, la durée de son oscillation est indépendante de l'amplitude de son mouvement.* C'est la loi de l'isochronisme des mouvements oscillatoires, que Galilée découvrit en observant, dans la cathédrale de Pise, le balancement d'un candélabre de Benvenuto Cellini (§ 6).

Enfin, nous avons besoin de connaître une dernière relation, après quoi nous abandonnerons les mathématiques. L'énergie de l'oscillation est l'énergie de la masse au moment de son passage par la position d'équilibre. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse ; mais nous avons vu que cette vitesse est elle-même proportionnelle à l'amplitude ; elle est aussi, évidemment, inversement proportionnelle à la durée de l'oscillation. Cette quantité, inverse de la durée d'oscillation, se nomme la *fréquence* ; elle est égale au nombre d'oscillations complètes (aller et retour) dans l'unité de temps. Et nous en concluons que *l'énergie d'une oscillation est proportionnelle à la fois au carré de son amplitude et au carré de sa fréquence.*

Interprétons maintenant la formule qui exprime la vitesse de la masse en mouvement. Lorsque cette masse passe par sa position d'équilibre, son point figuratif est au sommet de sa course et se déplace parallèlement à la masse elle-même ; toutes deux ont donc la même vitesse. Et comme, à ce moment, $x=0$, la vitesse est :

$$v = r\sqrt{\frac{\alpha}{m}};$$

c'est, en chaque instant, la vitesse du point figuratif. Or, la longueur de la circonférence étant égale à $2\pi r$, la durée de son parcours total est :

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\alpha}}.$$

Mais $\alpha = \frac{k}{r}$; c'est le taux d'augmentation de la force, lorsque le point s'éloigne de O, ou, numériquement, la valeur de la force à la distance de O égale à l'unité.

Cette formule est très générale; nous l'aurions trouvée identiquement pour une oscillation circulaire; m aurait figuré alors le moment d'inertie du volant, α le taux de variation du couple, ou le moment du couple pour l'angle égal à l'unité, c'est-à-dire à un tour divisé par 2π.

Nous pouvons nous figurer de bien des façons une masse ramenée vers son point d'équilibre par un effort proportionnel à son éloignement de ce point; nous pouvons, par exemple, nous l'imaginer prise entre deux ressorts à boudin, qui la tirent et la poussent alternativement. Pour les rotations, il suffit que nous suspendions un disque à un fil de métal, et qu'après l'avoir fait tourner sur lui-même nous l'abandonnions, pour le voir exécuter des oscillations sensiblement isochrones.

Peut-être comprendrons-nous mieux la fiction très utile du point figuratif lorsque nous en aurons saisi une image réelle dans sa nature, si même il est hors de notre portée de la matérialiser.

Newton a démontré que l'attraction d'une sphère homogène sur un point extérieur s'exerce comme si toute la matière de la sphère était ramassée en son centre, alors qu'une coquille sphérique est sans action sur un point intérieur. Si donc nous pouvions forer un puits traversant la terre suivant un diamètre, nous constaterions, à mesure que ce puits augmenterait en profondeur, une pesanteur décroissante, puisque l'attraction en chaque instant serait seulement exercée par la plus petite terre sphérique, concentrique à la nôtre, mais dont la surface passerait par le point où nous sommes momentanément. Or la masse de cette portion de notre terre serait proportionnelle au cube de son rayon, tandis que son attraction serait affaiblie par la distance inversement proportionnellement au carré de ce rayon; l'attraction serait donc proportionnelle au rayon lui-même. Une masse qu'on laisserait tomber dans le puits serait ainsi soumise à une attraction proportionnelle à sa distance au centre; et, si le puits était parfaitement vide de toute matière, de telle sorte que la masse n'éprouvât aucune résistance dans son mouvement, elle effectuerait indéfiniment des oscillations isochrones. Or si, en même temps qu'on abandonne cette masse dans le puits, on lançait horizontalement, à la surface de la terre, une petite lune avec une vitesse telle que la force centrifuge compense exactement son poids, elle tournerait (toujours dans le vide, bien entendu) de manière à être en tout instant le point figuratif du mouvement de la masse qui tombe dans le puits et remonte de l'autre côté. Les quelques formules données plus haut permettent de trouver la démonstration de cette curieuse relation.

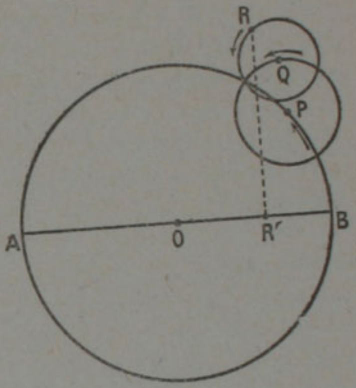


Fig. 38. — Les mouvements oscillatoires les plus compliqués peuvent être représentés par le mouvement d'une dent de roue dans un engrenage.

Le mouvement oscillatoire n'a pas toujours la simplicité que nous avons supposée. Le mouvement d'une particule d'air transmettant un son, celui de la membrane du téléphone ou de notre tympan, peut rarement être représenté par un mobile décrivant une circonférence d'un mouvement uniforme. S'il en était ainsi, nous aurions des sons d'une seule qualité, tandis que les sons diffèrent entre eux par le timbre. Or, sans insister sur ces faits, qui sont plutôt du domaine de la physique, il suffira de dire que, quelle que soit la complication d'un mouvement oscillatoire, il peut toujours être représenté par le mécanisme suivant.

Le point figuratif P du premier mouvement (fig. 38) est remplacé par le centre d'une circonférence, qu'un second point Q décrit en un temps deux fois moins long; celui-ci à son tour est le centre d'une troisième circonférence décrite en un temps trois fois moins long que la première, et ainsi de suite. On prendra ainsi autant de circonférences qu'il en faudra pour représenter le mouvement étudié (l'étude des courants alternatifs conduit à en prendre jusqu'à dix-sept); la projection R′ du point R décrivant la dernière circonférence sera le point figuratif du mouvement oscillatoire considéré.

Ces diverses circonférences sont assimilables à des roues engrenant les unes dans les autres. Elles sont numérotées à partir de la seconde; on les nomme les harmoniques du mouvement décrit par la première; leurs rayons sont les amplitudes des divers harmoniques.

Cette analyse des mouvements oscillatoires a été imaginée par le grand géomètre Fourier; elle est beaucoup employée dans une foule de problèmes scientifiques ou techniques. C'est elle qui a donné la clef du phénomène du timbre, dont Sauveur avait proposé, dès l'année 1700, une théorie devenue complète seulement après les travaux de Helmholtz.

40. — Le pendule et la pesanteur.

Lorsque la force n'est pas proportionnelle à l'écartement, l'isochronisme des petites oscillations n'est pas réalisé; les grandes oscillations sont de durée plus brève que les petites si la force augmente plus rapidement que l'écartement, plus longue si la force augmente plus lentement. Ces relations deviennent évidentes, si l'on procède comme nous l'avons fait, en remplaçant la droite OC (fig. 37) par une courbe concave ou convexe vers le haut.

Dans le cas du pendule, le poids PG (fig. 39) de la masse suspendue peut être décomposé en deux forces, dont l'une, PB, est dans la direction de la suspension, et n'agit pas sur la masse, tandis que l'autre, PA, lui est perpendiculaire, et entraîne seule cette dernière. Les triangles PAG et PCO étant semblables, la force est proportionnelle à CP, c'est-à-dire à l'écartement de la masse P de la verticale de départ. Or le chemin parcouru, compté sur l'arc de cercle, augmente plus vite que cet écartement; inversement, la force augmente moins vite que le chemin; on en conclut que les grandes oscillations sont plus lentes que les petites. Cependant, si l'amplitude reste dans des limites très étroites, l'arc de cercle est sensiblement égal à sa corde, et les oscillations ont sensiblement la même durée. C'est le principe approximatif de l'*isochronisme des petites oscillations*.

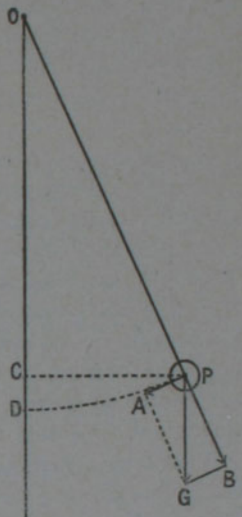


Fig. 39. — La force qui ramène la masse d'un pendule vers sa position d'équilibre croît moins vite que le chemin parcouru.

En traitant comme nous venons de le faire le mouvement du pendule, nous avons introduit, dans son exposé, une simplification permise lorsque ce pendule est constitué par une masse concentrée en un très petit espace, et suspendue à un fil dont on peut négliger la masse. Mais, en réalité, le problème est un peu différent : la masse tournant sur un arc de cercle centré sur le point de suspension, c'est son moment d'inertie autour de ce point que nous devrons considérer; et la cause qui produit le mouvement est un couple formé par le poids de la masse oscillante et la réaction égale du support. Ce problème apparaît nécessairement sous cette forme lorsque, au lieu de traiter le cas du pendule simple, on s'occupe d'une masse de forme quelconque oscillant autour d'un axe. Ainsi, le fléau d'une balance ou le balancier d'un métronome sont loin de ressembler au pendule simple.

Si l'on veut qu'une balance soit sensible, c'est-à-dire qu'elle s'incline beaucoup pour de très petites surcharges, il faut nécessairement que le couple ramenant le fléau soit très petit. Le moment de ce couple est égal au produit du poids du fléau par la distance de son centre de gravité à l'arête du couteau autour duquel il oscille. Si cette distance est faible, le couple ramène le fléau très mollement vers sa position d'équilibre, et l'oscillation est de longue durée.

En dehors de son mouvement d'horlogerie, le métronome se compose d'une masse oscillante que la pesanteur, aidée par un ressort, ramène vers sa position d'équilibre. La prépondérance dans ce sens est donnée par une pièce suspendue au-dessous de l'axe de rotation de l'instrument. Mais une autre masse peut glisser le long d'une tige située au-dessus, de manière à ce que, lorsqu'on l'élève, elle augmente le moment d'inertie du système, tout en amenant son centre de gravité plus près de l'axe. Ces deux actions travaillent ensemble à augmenter la durée de l'oscillation.

Il est bien nécessaire que l'on se rende un compte exact des causes intimes de l'oscillation d'un pendule. En abordant son étude comme nous l'avons fait, nous avons pu isoler bien nettement deux facteurs de cette oscillation qui sont, d'une part, la force ou le couple agissant, et, d'autre part, la force ou le couple de réaction de la matière entraînée. Lorsque la force agissante est fournie par un ressort qu'on écrase ou détend alternativement, ou lorsque le couple est engendré par la torsion d'un fil, aucune confusion dans les rôles des deux facteurs n'est possible. Mais, lorsque la pesanteur intervient, comme dans le cas du pendule, on est facilement tenté de mélanger l'action du poids, qui fournit la force agissante, et de la masse, qui provoque la réaction. La masse intervenant de deux façons, d'abord pour engendrer le poids, puis pour constituer la réaction, elle figure avec la longueur l au numérateur et au dénominateur de la formule

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{ml^2}{mlg}},$$

dans laquelle le radical contient le quotient du moment d'inertie par la valeur de couple; en simplifiant, on ne voit plus dans la formule que la longueur du pendule, c'est-à-dire la distance des forces constituant le couple de réaction, et l'intensité de la pesanteur. La durée de l'oscillation est alors exprimée, pour le pendule simple, par

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Cette relation est exacte en raison de la proportionnalité parfaite des poids aux masses; mais nous avons vu (§ 23) qu'elle est purement expérimentale et nullement nécessaire. En réalité, nous ne devons jamais oublier que l'oscillation du pendule est gouvernée par le couple actif, égal au produit de son poids par la distance de son centre de gravité à son axe de rotation, et par son couple de réaction, dont le facteur constant est son moment d'inertie.

Ce qui vient d'être dit fait comprendre enfin que, si l'on connaît la longueur d'un pendule simple et sa durée d'oscillation, un calcul immédiat fait connaître la valeur de g. C'est, en effet, au moyen du pendule que la pesanteur à la surface du globe est minutieusement explorée par les géodésiens. Autrefois, sa valeur était déterminée à l'aide d'un instrument se rapprochant autant que possible du pendule simple; aujourd'hui on emploie des pendules plus compliqués en apparence, mais qui conduisent à des opérations plus faciles et plus sûres.

Lorsque, de virtuelle, l'accélération devient réelle, le corps ne pèse plus (§ 33); si donc, on laissait tomber un pendule pendant qu'il oscille, g s'annulant, T deviendrait infini; en d'autres termes, le pendule tournerait indéfiniment autour de son axe de suspension à moins qu'il soit abandonné à l'extrémité de sa course; il resterait alors dans cette position inclinée [1].

1. Cette question a tourmenté plus d'une personne qui n'avait pas réfléchi à la différence essentielle entre les effets de l'accélération réelle et de l'accélération virtuelle. Non pas que l'on ait jamais songé à observer une horloge tandis qu'elle tombe d'un

41. — La résonnance.

Lorsqu'on veut élancer une escarpolette, on se garde bien, à moins d'être très fort, de la pousser d'un seul coup jusqu'au bout de son mouvement. On lui donne une impulsion, et on la laisse revenir ; puis, lorsqu'elle est prête à repartir, on lui donne une seconde impulsion qui accroît à la fois sa vitesse et l'amplitude de son mouvement, et ainsi de suite; on peut ainsi, sans se fatiguer, profiter de l'aide que nous donne le mouvement lui-même, et en augmenter l'étendue autant qu'on le veut.

Cette pratique résulte d'un phénomène très général, auquel on a donné le nom de *résonnance*, et qui se produit toutes les fois qu'un mouvement oscillatoire est entretenu par un effort de même période.

La résonnance possède une importance extrême; c'est grâce à elle que nous entendons et que nous voyons, parce que des mouvements vibratoires sont en concordance avec certains éléments de notre œil et de notre oreille, éléments moléculaires pour le premier, mécaniques pour la seconde. Par la résonnance, la marée prend la grande amplitude que nous lui connaissons dans certains océans, et notamment dans l'Atlantique : 14 ou 15 mètres au lieu d'un demi-mètre qu'elle aurait si l'oscillation devait, chaque fois, être excitée à nouveau; ainsi l'océan est une escarpolette que la lune pousse en mesure. Par la résonnance, on sonne les cloches les plus lourdes,

sixième étage; mais, pensant à l'attraction luni-solaire, on s'est souvent demandé si elle ne devait pas affecter considérablement les horloges. Cela serait évidemment le cas, si l'axe de suspension d'un pendule occupait une position fixe par rapport au soleil et à la lune. Mais la terre tombe constamment sur ces deux astres comme sur tout autre astre de l'univers, avec une accélération égale à celle qu'elle prendrait si toute sa matière était rassemblée en son centre. L'action sensible des astres sur le pendule est donc seulement égale à la différence des actions au centre de la terre et à sa surface; elle est très petite, et confine à la limite de précision des meilleures horloges.

et on abat les grands arbres dont on a attaqué le pied. Mais aussi, lorsqu'on fait vibrer à sa période propre un pont suspendu, on augmente tellement l'amplitude de son mouvement, que l'on arrive à rompre ses amarres. Tel a été le cas célèbre du pont d'Angers, qui s'effondra sous le pas cadencé d'un régiment, entraînant dans sa chute tous les soldats, dont beaucoup trouvèrent la mort dans les eaux de la Maine.

Dans la construction des navires, on évite avec le plus grand soin de donner aux machines la même période d'oscillation que celle de la coque, sous peine de voir celle-ci entrer en vibration, pour le plus grand danger du bâtiment. Le grand croiseur *Jeanne d'Arc*, par exemple, vibrait tellement qu'on dut en modifier la construction. L'un des avantages de la turbine comme moteur des navires est précisément d'éviter les mouvements oscillatoires.

De même, lorsqu'un vaisseau coupe la vague de telle sorte qu'il atteigne les crêtes successives à des intervalles égaux à la période de son mouvement, le tangage s'accentue au point de devenir très dangereux. On a vu ainsi des bateaux sombrer par une mer peu agitée, mais dont la lame était très régulière; il eût suffi, pour parer au danger, de changer l'allure du bâtiment; après un faible parcours, les vagues l'auraient attaqué à contre-temps de ses mouvements, et auraient produit ce que l'on nomme un *battement*, c'est-à-dire une décroissance et un arrêt momentané du tangage, causé par le fait qu'après avoir agi dans le sens de la vitesse, les impulsions se décalent progressivement et détruisent peu à peu le mouvement qu'elles ont engendré.

Le battement est le résultat d'une résonnance imparfaite; il limite l'amplitude, et ramène, à intervalles réguliers, le corps vibrant au repos. Mais, si l'on veut éviter absolument les effets de la résonnance, il faut se méfier même des battements, surtout s'ils sont lents, parce qu'il suffit alors d'un petit changement dans la période de la vibration excitatrice ou dans celle du corps vibrant, pour produire la résonnance véritable. Il est plus sage de brouiller complètement les impulsions quand on le peut; c'est ainsi que l'ordre est toujours donné aux troupes qui doivent passer sur un pont suspendu de rompre le pas, et de marcher comme des moutons. C'est une salutaire précaution, suggérée par la catastrophe d'Angers.

Les effets de la résonnance seraient plus souvent désastreux, si un second phénomène parasite n'intervenait toujours pour les limiter; ce phénomène est l'amortissement dû aux frottements et à toutes les causes de consommation de l'énergie cinétique. Cette consommation augmente toujours avec l'amplitude du mouvement, et finit par égaler l'énergie des impulsions; alors le phénomène se stabilise, l'amplitude de l'oscillation se fixe à une valeur qu'elle ne dépasse plus. Le tout est de savoir si cette valeur est au-dessous de l'amplitude dangereuse; sinon, il faut ou augmenter l'amortissement, ou changer la période d'oscillation du mobile ou de l'impulsion excitatrice. Ces procédés sont bien connus des ingénieurs, qui en font un fréquent usage.

Le ténor Tamburini faisait voler en éclats une coupe de cristal, en donnant avec force la note correspondant à sa vibration naturelle. Celle-ci, excitée par les ondes sonores, s'amplifiait graduellement, et dépassait l'étendue de la déformation que le cristal peut supporter. Il eût suffi de toucher le bord de la coupe avec la barbe d'une plume pour empêcher la vibration d'atteindre la limite dangereuse, et même pour lui conserver une très faible amplitude.

Ainsi, tour à tour, nous utilisons la résonnance, ou nous l'évitons avec soin. L'exemple le plus fréquent de résonnance provoquée et entretenue nous est fourni par le régulateur des horloges et des montres; le choc, sollicité par la pièce oscillante elle-même, lui restitue l'énergie dépensée à vaincre la résistance de l'air et à entraîner les rouages, dans le mécanisme merveilleux qui marque, pour nous, la fuite du temps.

TROISIÈME PARTIE

DÉVELOPPEMENTS ET APPLICATIONS

Bien que, dans notre rapide excursion au travers des principes de la mécanique, nous ayons toujours eu, pour nous en faire sentir la véritable nature, l'exemple de ce qui se passe autour de nous, nous les avons aperçus jusqu'ici sous un aspect en quelque sorte restreint, par le fait que nous n'avons vu, des phénomènes étudiés, que celle de leurs particularités sur laquelle notre attention devait être momentanément dirigée. Il faut maintenant que nous abordions des problèmes plus complexes, où divers principes concourent à produire l'effet que nous voulons étudier. Ainsi, nous en comprendrons plus complètement la coordination et la cohésion, et nous serons mieux préparés, lorsque nous aurons résolu quelques problèmes, à faire l'application de ce que nous venons d'apprendre. Ces problèmes ne seront plus d'ordre général ; ils auront trait à des conditions particulières, et conduiront à des résultats numériques. Il faut donc que nous fassions connaissance avec les unités au moyen desquelles on exprime toutes les quantités dont s'occupe la mécanique.

CHAPITRE VIII

LES CALCULS DE LA MÉCANIQUE

42. — Relations qualitatives et relations quantitatives.

Avant d'aborder les calculs auxquels conduisent les problèmes de la mécanique, nous devons jeter un rapide coup d'œil en arrière, et passer en revue les diverses quantités dont elle s'occupe, afin de dégager ce qu'on pourrait appeler leurs relations de famille, et d'établir leur arbre généalogique; mais tout d'abord, il est un principe qui ressortira d'une réflexion très simple.

Si, ayant mis 100 pommes dans un panier nous n'en retrouvons plus que 99, nous n'en serons que médiocrement surpris; nous admettrons qu'un petit gourmand en a pris une. Mais, si nous y retrouvions 100 poires, nous chercherions plus loin l'explication de ce singulier phénomène. Nous n'admettrions pas un instant que nos pommes se sont muées en poires, et nous serions certains qu'elles ont été enlevées et remplacées.

Le premier changement aurait porté sur la *quantité*, le second sur la *qualité*; le premier sur le *nombre*, le second sur l'*espèce*. Et nous comprenons, sans insister, que le second changement est beaucoup plus fondamental que le premier. Sans doute, le contenu du panier a été modifié dans les deux cas; mais il l'a été très peu la première fois, beaucoup la seconde, bien que le nombre des objets soit resté le même.

Si, au lieu de panier nous disons équation, si au lieu de pommes nous disons forces, nous nous rapprocherons d'un problème de la mécanique. Le panier contient des pommes ou des poires comme l'équation contient des forces, ou des pressions, ou toute autre grandeur que nous connaissons.

Nous comprenons maintenant que, si nous mettons des forces dans une équation, nous ne pourrons pas y retrouver des pressions; que, de plus, l'égalité ne peut exister qu'entre deux quantités de même espèce, et qu'avant de nous occuper de la valeur numérique de ces quantités, nous aurons à nous assurer de leur nature. En d'autres termes, une équation, avant d'être vérifiée numériquement, c'est-à-dire quantitativement, doit l'être dans l'espèce de son contenu, c'est-à-dire qualitativement.

Il semblerait à peine nécessaire d'insister sur des questions aussi simples si elles n'étaient souvent mal comprises, même des étudiants avancés.

Mais on peut aller un peu plus loin. Les diverses grandeurs ne constituent pas des êtres isolés; elles présentent entre elles des liens de parenté, qui ressortent de leur définition même. Déplaçant une force dans sa propre direction, nous produisons du travail; répartissant le travail dans le cours du temps, nous réalisons la puissance mécanique; étalant la force sur une surface, nous obtenons la pression; et nous pouvons dire que le travail est le produit de la force par son déplacement, la puissance le quotient du travail par le temps, la pression celui de la force par la surface.

Il est cependant une opinion très répandue, suivant laquelle de telles relations seraient purement numériques; dire que la pression est le quotient de la force par la surface signifierait alors simplement ceci : la *valeur numérique d'une pression* est égale au quotient de la *valeur numérique de la force* par la *valeur numérique de la surface*. Mais c'est là une façon trop restreinte de considérer les relations entre les quantités; la genèse de la pression est bien réellement la dissémination d'une force dans une surface, c'est-à-dire le *quotient de la grandeur qu'on appelle la force par la grandeur qu'on appelle la surface*; et nous verrons dans un instant que les équations établies dans cette idée peuvent conduire l'intelligence vers la découverte des similitudes dans la nature même des grandeurs.

Si l'on utilise toutes les relations que nous avons établies, on peut ramener toutes les grandeurs de la mécanique à trois d'entre elles convenablement choisies; la longueur, la masse et le temps sont de nature simple, et, en les conservant comme grandeurs fondamentales, on arrive facilement à toutes les autres.

On est convenu de marquer par un signe que l'on veut parler seulement de la nature d'une grandeur et non de sa valeur numérique; on a créé dans ce but un symbole consistant à désigner la grandeur par une lettre majuscule entre crochets; les équations dans lesquelles nous trouverons de semblables symboles seront alors des équations qualitatives et non des équations quantitatives.

Or ces équations contiennent la genèse des divers objets et marquent les liens qui les unissent. Il est utile de les connaître, et c'est pourquoi nous rassemblons ici les relations qui existent entre les grandeurs de la mécanique.

GRANDEURS FONDAMENTALES

Longueur [L]. Masse [M]. Temps [T].

GRANDEURS DÉRIVÉES

Surface	= longueur × longueur	= $[L^2]$
Volume	= surface × longueur	= $[L^3]$
Vitesse	= longueur / temps	= $[LT^{-1}]$
Accélération	= vitesse / temps	= $[LT^{-2}]$
Force	= masse × accélération	= $[MLT^{-2}]$
Pression	= force / surface	= $[ML^{-1}T^{-2}]$
Travail	= force × longueur	= $[ML^2T^{-2}]$
Énergie cinétique	= masse × vitesse²	= $[ML^2T^{-2}]$
Puissance	= travail / temps	= $[ML^2T^{-3}]$
Impulsion	= force × temps	= $[MLT^{-1}]$
Quantité de mouvement	= masse × vitesse	= $[MLT^{-1}]$

En regardant ces symboles, on voit immédiatement que le travail et l'énergie cinétique, bien qu'ayant des origines différentes, sont des quantités de même espèce; il en est de même pour l'impulsion et la quantité de mouvement. Ainsi, les relations qualitatives révèlent les parentés entre les grandeurs, établissent les similitudes, et empêchent de confondre celles qui diffèrent [1].

On pourrait combiner diversement les symboles pour trouver d'autres relations. Un exemple suffira : multiplions le symbole de la pression $[ML^{-1}T^{-2}]$ par celui du volume $[L^3]$, nous trouverons $[ML^2T^{-2}]$, qui est celui du travail; et l'opération automatique que nous venons de faire nous montre que, lorsqu'on agrandit un volume dans lequel règne une pression, on produit du travail. Nous l'avions trouvé autrefois par un raisonnement minutieux.

43. — Les unités de la mécanique.

On pourrait choisir, pour chaque grandeur de la mécanique, une unité de mesure quelconque; mais on ne profiterait pas des simplifications auxquelles conduisent les liaisons que nous venons d'établir. Puisque trois grandeurs fondamentales suffisent pour constituer toutes celles de la mécanique, les unités de ces trois grandeurs permettront de tout mesurer.

Grâce à l'œuvre immortelle d'une pléiade d'hommes auxquels nous devons vouer une profonde reconnaissance,

1. Les personnes qui refusent aux équations qualitatives une existence propre sont tout naturellement conduites à confondre les grandeurs; le terme « force vive » ne les choque pas (au figuré); et on les entend souvent dire « une pression » pour « une force »; certaines d'entre elles vont même jusqu'à affirmer qu'il y a subtilité ou pédantisme à chercher dans ce domaine un langage rigoureux; et cependant, ces mêmes personnes se plaindraient sans aucun doute si, lorsqu'elles commandent des pommes, on leur livrait des pommes de terre; l'erreur cependant serait moindre. Que nos lecteurs s'habituent à la rigueur du langage; cela coûte peu et évite bien des malentendus.

la quantité innombrable des unités de longueur ou de masse en usage il y un siècle cède peu à peu la place à un système unique, simple, rationnel et présentant un ensemble de qualités qui le placent bien au-dessus de tous les autres. Ceux-ci ont presque tous disparu; il ne reste guère, à côté du système métrique, que l'ensemble hétérogène des mesures britanniques, suffisamment caractérisé comme étant l'absence de tout système; mais ces mesures disparaîtront à leur tour, il n'en faut pas douter; nous pouvons donc les ignorer sans aucun dommage.

L'unité des longueurs est le *mètre*, l'unité des masses le *kilogramme*. Leurs prototypes sont déposés au Bureau international des poids et mesures, et les États ayant adhéré à la Convention du Mètre en ont reçu des copies déterminées avec une grande exactitude. L'unité de mesure du temps est la fraction $1/24 \times 60 \times 60$ ou $1/86\,400$ du jour solaire moyen; on la nomme *la seconde de temps moyen*. Son étalon nous est donné par la rotation de la terre. Ainsi, les unités de la mécanique sont représentées par des étalons qui sont à la portée de chacun.

Pour mesurer des quantités très grandes ou très petites, on pourra se servir soit des multiples, soit des sous-multiples des unités fondamentales. Les physiciens qui mesurent souvent de petites quantités ont choisi comme unité de longueur le centimètre et comme unité de masse le gramme, tout en conservant la seconde comme unité de temps. Pour les physiciens, l'unité de la vitesse sera donc la vitesse d'un mobile parcourant un centimètre par seconde. Pour les mécaniciens, le mètre par seconde sera d'une grandeur plus commode. Lorsqu'il s'agira de transports, on exprimera souvent la vitesse en kilomètres à l'heure; mais, pour les calculs de la mécanique, on ramènera cette vitesse à la seconde comme unité de temps.

Le changement de vitesse est l'accélération. Pour en établir l'unité, nous considérerons un train marchant en palier et dont la vitesse augmente régulièrement; puis nous supposerons qu'à la fin de deux secondes successives, le train perde son wagon de queue, qui continuera sa route librement. Nous pourrons exprimer la vitesse de ces wagons par exemple en mètres par seconde. La différence de ces vitesses sera également donnée en mètres par seconde; comme cette différence a été engendrée en une seconde, l'accélération sera exprimée en mètres par seconde par seconde. Bien entendu, nous l'exprimerions tout aussi bien en centimètres par seconde par seconde.

Un effort est toujours le produit d'une masse par une accélération; si nous évaluons l'effort qui donne à la masse de 1 gramme une accélération de 1 centimètre par seconde par seconde, c'est-à-dire si nous multiplions 1 gramme par cette valeur de l'accélération, nous obtenons une unité de force que les physiciens nomment la *dyne*. En remplaçant cette accélération par une autre qui ait pour base le mètre, et la masse par celle du kilogramme, nous aurons une force cent mille fois plus grande que la dyne. Mais cette unité de force est peu employée; on lui préfère l'unité dix fois plus grande, égale à un million de dynes ou à une *mégadyne*; nous allons en comprendre la raison.

Le hasard veut que nous habitions une planète à la surface de laquelle l'accélération de la chute libre des corps est de 9,81 mètres par seconde par seconde environ [1]. L'accélération virtuelle d'un corps en repos engendre une force égale au produit de sa masse par cette valeur de l'accélération. L'effort exercé sur son support par une masse de 1 kilogramme est donc égale au produit de 1 kilogramme par 9,81 mètres par seconde par seconde, ou 9,81 m/sec^2.

La facilité avec laquelle on peut se procurer partout un étalon de force représentant cette valeur a conduit à la prendre fréquemment comme unité sous le nom de *kilogramme-force*. Dans le choix d'une unité rationnelle, c'est-à-dire exprimée par un nombre simple, il y a un grand intérêt à conserver l'ordre de grandeur des unités usuelles. En substituant 10 mètres à 9,81 mètres dans l'expression

1. L'accélération varie, comme nous l'avons vu [§ 27], à la surface de la terre. La valeur adoptée comme normale est celle qui règne au niveau de la mer, sous le parallèle de 50 grades; on l'admet comme égale à 9,80665 m/sec^2.

de l'accélération, on ne la modifie que de 2 p. 100, et, dans bien des applications, on peut confondre la mégadyne avec le poids de 1 kilogramme. La dyne pourra aussi être assimilée au poids de 1 milligramme.

Déplaçant une unité de force d'une unité de longueur, nous constituerons une unité de travail. Ce sera, pour les physiciens, la dyne-centimètre, nommée *erg*; pour les mécaniciens, la mégadyne déplacée d'un décimètre, et que l'on nomme *joule*; ou encore le kilogramme-force déplacé d'un mètre, et qui engendre le *kilogrammètre*.

Enfin, l'unité de puissance sera le joule par seconde, auquel on a donné le nom de *watt*, ou l'unité mille fois plus grande, le *kilowatt*. 100 kilogrammètres par seconde constituent un *poncelet*, qui tend à être substitué au cheval, unité vieillie, de 75 kilogrammètres par seconde.

On peut, en multipliant une puissance par une durée, constituer une unité de travail : ainsi, le *kilowatt-heure* est le travail produit par 1 kilowatt pendant une heure.

Pour la pression, 1 mégadyne répartie sur 1 centimètre carré est une *mégabarye*; c'est, à très peu près, la pression exercée par une colonne de mercure de 75 centimètres de hauteur, à 0°, et pour la pesanteur normale. Laplace a proposé, il y a plus d'un siècle, d'utiliser aussi comme unité la pression moyenne de l'atmosphère au niveau de la mer; on lui donne le nom d'*atmosphère*, et on la définit par une colonne de mercure de 76 centimètres. Enfin, en répartissant 1 kilogramme-force sur 1 centimètre carré, on obtient une troisième unité de pression, beaucoup employée dans l'industrie.

Les relations numériques entre les unités dynamiques sont résumées ci-après.

Force :	1 kilogramme-force	= 0,981 mégadyne.
Travail :	1 kilogrammètre	= 9,81 joules.
	1 joule	= 1 mégadyne-décimètre.
Puissance :	1 poncelet	= 100 kilogrammètres par seconde.
		= 0,981 kilowatt.
Pression :	1 kilogramme-force/cm²	= 0,981 mégabarye.
	1 atmosphère	= 1,013 mégabarye.

CHAPITRE IX

LE CHOC

44. — Définition du choc.

Nous commencerons par un phénomène resté pendant longtemps très mystérieux, en raison de sa complexité et de la difficulté de son étude. Faisant intervenir des propriétés très cachées de la matière, le principe du choc devait échapper à la perspicacité des premiers mécaniciens, et ne pouvait être révélé qu'à des chercheurs pourvus d'un outillage très parfait. On peut même dire que toutes les particularités du choc ne sont pas connues aujourd'hui, en raison de leur extrême diversité; mais elles le sont assez pour que nos jeunes amis voient leur curiosité amplement satisfaite dans l'étude que nous allons en faire.

Deux billes de billard vont l'une vers l'autre; au moment où elles se rencontrent, elles font entendre un bruit sec, puis elles se séparent et poursuivent leurs routes dans des directions diverses. Une balle élastique lancée contre un mur rebondit et retombe dans la main de la fillette qui l'a projetée; au contraire une boulette de terre glaise s'aplatit et retombe au pied du mur, ou y reste appliquée, marquant sa présence d'une vilaine tache brune.

Un marteau frappant une enclume rebondit; mais, si une balle de plomb est interposée, le marteau rend un son mat, et reste comme affalé. Les forgerons sentent bien lorsqu'ils doivent cesser de forger le fer ou l'acier. Au rouge, le marteau enfonce dans le métal sans aucune velléité de se relever; mais, à mesure que le fer pousse au noir, les coups prennent de la sonorité, et le marteau tombe moins lourdement.

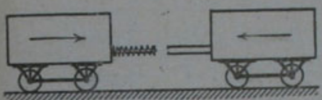
Il y a donc bien des espèces de chocs, que l'on peut ranger entre deux extrêmes, auxquels on a donné les noms de *choc élastique* et de *choc mou*. En réalité, tous les chocs sont plus ou moins élastiques et plus ou moins mous; ils ont cette propriété commune de déformer la matière et de développer en elle des réactions.

45. — Image du choc élastique.

Si nous voulions faciliter notre étude du choc, nous construirions deux petits chariots montés sur rails, et dont l'un porterait un tampon, mais pas un tampon ordinaire, comme ceux des wagons de chemin de fer : un tampon constitué par un long ressort à boudin enfilé sur une tringle (fig. 40), et contre lequel viendrait buter un tube porté par l'autre chariot. Chacun des chariots serait muni d'un crayon, qui marquerait sa position sur une feuille de papier se déroulant perpendiculairement à la voie; les tracés relevés sur le papier nous montreraient le détail de ce que nous pouvons observer en gros toutes les fois que nous voyons un wagon tamponner un autre wagon en repos, et lui donner une partie de sa vitesse. Mais maintenant, nous connaissons assez de mécanique pour pouvoir deviner presque tout ce qui se passera.

Représentons (fig. 41) la valeur de l'effort développé sur chacun des chariots à partir du moment où le tube entre en contact avec le ressort. Cet effort augmente graduellement, et produit sur chacun des chariots un travail qui diminue son énergie cinétique. Le travail déjà accompli lorsque les mobiles sont arrivés en C et D, est représenté par la surface des triangles ACC′, BDD′. Un moment vient où toute l'énergie cinétique est consommée, c'est-à-dire où les deux chariots sont en repos. Mais à ce moment le ressort est tendu et pousse les deux chariots en arrière; ils s'écartent, le ressort se détend peu à peu et le contact cesse tout à fait. Tous les efforts que les chariots ont subis lorsqu'ils s'approchaient l'un de l'autre, ils les retrouvent aux mêmes endroits; le même travail est donc effectué par le ressort, et les chariots reprennent l'énergie cinétique, et partant la vitesse qu'ils possédaient au début.

On peut dire que tout se passe comme si les chariots



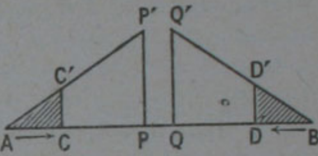


Fig. 40 et 41. — Un tampon repousse et sépare deux wagons marchant l'un vers l'autre; le diagramme des efforts qu'ils subissent explique les variations de leur vitesse.

montaient des pentes commençant en A et B et devenant de plus en plus raides à mesure du chemin parcouru, en affectant la forme de portions de paraboles; il viendrait un moment où les chariots s'arrêteraient une fois leur vitesse perdue, et redescendraient vers leur origine.

La simple considération de la symétrie, jointe à l'idée que toute l'énergie cinétique existant dans le système au premier contact avec le ressort doit se retrouver au moment où les wagonnets se séparent, nous a permis de traiter complètement le problème, et d'arriver à une solution ne laissant aucun doute.

Mais nous allons compliquer un peu les conditions et supposer qu'au début l'un des wagonnets, celui de droite par exemple, soit au repos, et que l'autre s'avance vers lui avec un vitesse $2v$. Cette fois, au lieu de wagonnets, nous nous représenterons des wagons sur une voie ferrée, roulant parallèlement à une autre voie que nous parcourrons nous-mêmes avec une vitesse v, dans le même sens que le wagon de gauche. Alors, pour nous qui pouvons nous croire en repos, ces deux wagons s'avancent l'un vers l'autre avec la même vitesse v; rien ne sera changé par rapport au premier cas, et l'apparence sera la suivante :

	Gauche.	Droite.
Avant le choc	$\rightarrow v$	$\leftarrow v$
Milieu du choc.	repos	repos
Après le choc	$\leftarrow v$	$\rightarrow v$

Un spectateur resté debout à côté de la voie corrige notre observation, et nous saurons ce qu'il voit en ajoutant à chacune des vitesses observées celle de notre wagon, de gauche à droite; le tableau réel sera donc le suivant :

	Gauche.	Droite.
Avant le choc.	$\rightarrow 2v$	repos
Milieu du choc	$\rightarrow v$	$\rightarrow v$
Après le choc.	repos	$\rightarrow 2v$

Le résultat est surprenant et cependant exact : *les vitesses se sont échangées.*

La théorie du choc paraissait si mystérieuse à ceux qui l'établirent, que le célèbre Huyghens dut se servir, pour comprendre cet échange de vitesse, d'un procédé analogue à celui dont nous venons de faire usage.

Nous pouvons retrouver ce résultat en considérant le travail effectué par le ressort sur nos deux wagons.

Le ressort se comprime jusqu'au moment où les deux vitesses sont égales, c'est-à-dire jusqu'à ce que les wagons soient au repos relatif. Conformément au principe de la conservation de la quantité de mouvement, leur vitesse commune sera la moitié de la vitesse initiale du wagon de gauche. En effet, la quantité de mouvement était avant le choc :

$$m.2v + m.\,0 = 2mv.$$

Au fond du choc elle est :

$$2m \times \text{vitesse commune} = 2mv.$$

donc : vitesse commune $= v$.

Le travail du ressort ayant donné au wagon de droite la vitesse v, ce même travail, fait à rebours (surfaces APP', BQQ'), achèvera d'annuler la vitesse du wagon de gauche.

Nous aurions pu donner à nos deux wagons des vitesses quelconques; les deux modes de raisonnement que nous venons d'employer nous auraient conduits à cette conclusion finale : *Lorsque deux masses égales se rencontrent dans un choc élastique, elles échangent leurs vitesses.*

Si les deux masses sont inégales, il ne peut y avoir échange, cela est évident. Un obus frappant un cuirassé ne lui communique pas sa propre vitesse, heureusement. Nous pourrions trouver sans peine des formules qui conviennent à ce cas, mais leur établissement exigerait quelques instants que nous pouvons employer plus utilement; il nous suffira de dire quelle est la méthode que nous suivrions.

Nous écririons d'abord que la quantité de mouvement de l'ensemble des deux masses reste constante; puis nous supposerions que nous sommes montés sur l'un des objets en mouvement contre lequel l'autre vient buter et rebondit: telle une balle élastique contre une muraille. La vitesse de la balle, pour une personne qui la voit d'une fenêtre, change simplement de signe; la vitesse relative des masses change donc elle-même de signe. Il suffit d'écrire en langage algébrique tout ce que nous venons de dire, pour que l'algèbre nous réponde à son tour en nous donnant les valeurs des vitesses.

Retenons, de la méthode que nous venons de décrire, un résultat intéressant : le rebondissement de l'un des corps sur l'autre est le changement de signe de leurs vitesses relatives. Supposons que l'un des corps A soit de très grosse masse par rapport à l'autre B, et s'avance vers lui. Au moment du choc, A ne reçoit qu'une secousse insignifiante, et continue sa marche sans changement appréciable de vitesse; tout le changement porte sur B, qui recule alors avec une vitesse double de celle de A. Si, en plus, B s'avance vers A, sa vitesse change de signe, de telle sorte qu'après le choc sa vitesse totale est égale à sa propre vitesse, augmentée du double de la vitesse de A. Ainsi s'expliquent les vitesses considérables que prennent les balles de tennis ou de golf. Nous reprendrons dans un instant l'étude de ce dernier sport.

46. — Le choc réel.

Si, dans ce qui précède, nous avons étudié quelque chose qui ressemble au choc, ce n'est pas le choc proprement dit que nous avons appris à connaître, avec sa soudaineté et le bruit qui l'accompagne, bruit tellement lié à l'ensemble du phénomène, que c'est lui quelquefois qui en porte le nom : on *entend* un choc. Si l'on avait su assimiler le choc à l'image que nous en avons donnée, on l'aurait compris plus tôt; mais elle en paraissait trop lointaine pour pouvoir servir à son étude.

Ce sont les physiciens qui ont enseigné à considérer le choc comme l'écrasement d'un ressort; ils ont trouvé que ce ressort est constitué par la matière elle-même, qui se déforme au point de contact, absorbe le travail, puis le restitue en séparant les corps l'un de l'autre. Mais, comme cet écrasement est très faible, le travail est absorbé et restitué sur un très petit parcours, c'est-à-dire en mettant en jeu une force très grande.

L'écrasement des corps dans le choc est si petit que sa mesure est presque impossible; mais il est deux éléments que l'on peut déterminer aisément et avec précision dans le cas où les corps se touchent par une surface courbe; où, par exemple, ce sont des sphères qui se choquent. Ces éléments sont l'étendue de la surface qui entre réellement en contact, par l'écrasement d'une petite calotte sphérique, et la durée pendant laquelle les corps se touchent. Pour mesurer la surface, il suffit, par exemple, de nettoyer parfaitement l'une des sphères, et de frotter l'autre avec un chiffon gras; la première porte, après le choc, une petite tache, dont on mesure le diamètre avec un microscope.

Pour la durée, le procédé est un peu plus compliqué. On suspend les sphères à des fils métalliques, que l'on relie à un circuit contenant une pile et un galvanomètre. Lorsque les sphères arrivent au contact, le courant électrique traverse le galvanomètre pendant un temps extrêmement court, et lui donne une impulsion qui cesse dès que les corps se séparent. On peut ensuite faire passer, dans le même galvanomètre, le courant pendant un temps connu et aisé à mesurer, par exemple un dixième de seconde. Faisant la proportion, on connaît la durée du choc.

Dans des expériences ainsi conduites, Schneebeli a trouvé, parmi d'autres résultats, que la durée du contact de deux sphères d'acier, de 70 millimètres de diamètre, se rencontrant avec une vitesse relative de 776 millimètres par seconde, est d'environ 2 *dix-millièmes de seconde*.

Le diamètre du cercle de contact est, dans les mêmes conditions, très voisin de 2 millimètres. Quant à l'effort au moment du plus grand rapprochement des sphères, il est de *près de mille mégadynes* ou d'environ mille kilogrammes-poids.

Sur les bords de la surface de contact, la déformation est très faible, et la réaction de la matière l'est aussi; c'est au centre de cette surface que cette déformation, et par conséquent la pression, atteint son maximum. On a trouvé (ceci est un résultat du calcul), des pressions de 50 000 mégabaryes, c'est-à-dire de l'ordre de 500 kilogrammes par millimètre carré. Sous une telle pression, agissant sur toute la surface d'une pièce d'acier, pendant un temps qui ne serait pas très bref, le métal s'écraserait, tout comme les fils du meilleur acier (les cordes à piano), se briseraient sous une traction de même valeur numérique. Et cependant, après des pressions qui produisent nécessairement des déformations équivalentes, l'acier revient à sa forme primitive, lorsqu'il les a subies par l'effet d'un choc. Cela provient de deux causes qui ajoutent leurs effets : la première est la durée extraordinairement faible de la déformation; la seconde tient à ce que la partie la plus déformée refoule violemment la matière tout autour d'elle, et que celle-ci, revenant brusquement en arrière, ramène la petite portion centrale à la place qu'elle occupait avant le choc.

Les joueurs de « golf » qu'étreint la passion du sport sont loin de se douter de celle que l'on peut mettre à l'étude des particularités du choc, dans la rencontre de la balle avec le « club ». Le célèbre physicien P.-G. Tait, dont le fils Freddy, champion du golf, fut tué dans la guerre du Transvaal, avait voué à l'étude scientifique de ce jeu un beau travail dont nous allons reproduire quelques résultats.

La balle est en gutta-percha ; sa masse est de 42 grammes, celle de la tête du club de 220 grammes. Aux mains d'un joueur habile et vigoureux, celle-ci peut atteindre la vitesse de 100 mètres par seconde ; le choc complètement élastique avec une balle en repos communiquerait à celle-ci une vitesse qui ne serait pas très inférieure à 200 mètres par seconde, puisque la masse du club est très supérieure à celle de la balle.

Au fond du choc, la surface de contact est un cercle dont le diamètre atteint parfois 20 millimètres ; mais la durée du contact est extrêmement faible, probablement inférieure à un dix-millième de seconde, de telle sorte que le club ne voyage pas avec la balle sur un parcours supérieur à 1 centimètre. Mais combien cet intervalle de temps est bien employé par la matière pour assurer l'échange d'énergie entre le club et la balle ! L'effort moyen est de 6 700 mégadynes ; il est ainsi 160 000 fois supérieur au *poids* de la balle. L'accélération est dans la même proportion avec celle de la pesanteur, ou de 1 600 km par seconde par seconde. Si l'effort du club sur la balle pouvait être soutenu seulement pendant une seconde, il lui donnerait une vitesse qui, dans la seconde suivante, lui ferait parcourir dans le vide la distance de Paris à Tanger.

Ces nombres sont fantastiques ; ils nous font comprendre combien l'étude du choc devait paraître ardue à l'époque où l'on n'avait pas le moyen de mesurer des durées extrêmement courtes. Avant d'en avoir la preuve expérimentale, on devait trouver de grandes difficultés à admettre que d'aussi prodigieux efforts pussent prendre naissance aussi simplement, et que la matière pût leur résister.

47. — Le choc non élastique.

Si, dans la rencontre de nos wagonnets, le ressort se brisait au moment où il arrive au bout de sa course, nos chariots ne reculeraient plus; tout le travail qu'ils auraient employé pour écraser le ressort serait perdu, et ils resteraient appuyés l'un contre l'autre. Il en serait de même, dans la seconde image de l'action qui les sépare, si l'échafaudage sur lequel ils montent s'effondrait brusquement au moment où ils sont arrivés au point le plus haut de leur course. Mais nous pouvons envisager d'autres cas: nous pouvons supposer que le ressort, fléchi au delà de ce qu'il peut supporter, ne se détende plus comme auparavant; ou que les pentes sur lesquelles montent les wagonnets soient abaissées pour le retour, ou enfin que les wagonnets montent non sur des rails, mais sur une route boueuse. Alors ils ne retrouveront plus, en chaque endroit, des efforts moteurs égaux aux efforts retardateurs dans la période d'approche; ils n'abandonneront pas les pentes avec la vitesse avec laquelle ils les ont abordées, il y aura quelque chose de perdu.

Considérons d'abord deux wagonnets semblables; ou, puisque nous sommes plus avancés dans notre étude, deux sphères de même masse se rencontrant avec des vitesses égales et opposées. Les courbes des efforts pendant le rapprochement seront AB et CD (fig. 42), mais pendant que les sphères reculent, ils seront représentés par BE et DF. Le travail au rapprochement sera donné par les surfaces ABP et CDQ; à l'éloignement par BEP, DFQ. Il y aura donc du travail perdu, représenté par les surfaces ABE, CDF; les sphères reculeront encore symétriquement, mais avec une vitesse moindre qu'à l'aller.

Si l'une des sphères est au repos au début, le travail dépensé par l'autre sphère est donné par la somme des surfaces ABP, CDQ; mais le travail récupéré n'est plus représenté que par les surfaces BEP, DFQ.

Au fond du choc, les sphères n'ont pas de vitesse relative, c'est-à-dire qu'elles ont toutes deux une vitesse égale à la moitié de celle de la sphère A avant le choc, puisque

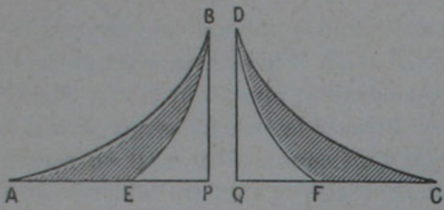


Fig. 42. — Dans le choc non élastique, les efforts pendant l'éloignement sont plus faibles qu'à l'approche.

la quantité de mouvement s'est conservée; mais, puisque le travail encore disponible est moindre que le travail déjà dépensé, la sphère B prendra une vitesse moindre que celle que possédait, avant le choc, la sphère A. Or, la somme des vitesses est la même à tout instant; la sphère A poursuivra donç sa marche, mais avec une vitesse diminuée.

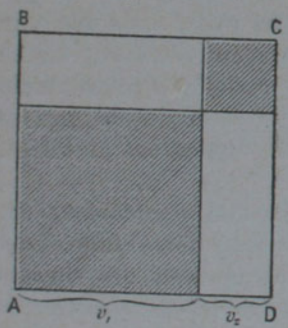


Fig. 43. — Les surfaces hachurées représentent la proportion du travail récupéré dans le choc non élastique.

Soit $2v$ la vitesse de A avant le choc. Les vitesses v_1 et v_2 après seront telles que $v_1 + v_2 = 2v$. Mais l'énergie cinétique, $\frac{1}{2} mv_1^2 + \frac{1}{2} mv_2^2$, sera inférieure à $\frac{1}{2} m(2v)^2$, comme nous le voyons immédiatement en considérant le carré ABCD (fig. 43), dont le côté est égal à $v_1 + v_2$, et dont la superficie est $(v_1 + v_2)^2$ ou $(2v)^2$, tandis que $v_1^2 + v_2^2$ est donné par les surfaces hachurées.

On peut supposer maintenant que le choc des sphères soit tout à fait mou; c'est le cas du ressort brisé ou de l'échafaudage effondré; au rapprochement, le travail consommé est ABP et CDQ; mais alors l'effort cesse brusquement, les corps ne retournent pas en arrière, ils restent collés l'un à l'autre. Si l'un était au repos au début, ils arrivent au fond de leur course avec la moitié de la vitesse que possédait l'autre, et ils continuent leur marche sans se séparer: telles deux mottes de beurre que l'on aurait plaquées l'une contre l'autre.

48. — Les formes de l'énergie.

Il y a, dans le choc, quelque chose qui paraissait très mystérieux aux anciens mécaniciens, et qui est bien fait pour nous déconcerter encore. Nous savons, et ils savaient aussi, au moins depuis Galilée, que le travail se retrouve en entier dans l'énergie cinétique des corps et inversement. Une masse qui est descendue le long d'une pente est capable de remonter à la même hauteur, ou si près que la petite différence trouve immédiatement sa cause dans les inévitables frottements. Mais nous venons de voir qu'une partie de l'énergie peut disparaître dans le choc non élastique; et, dans le choc mou de deux corps de même masse, ils s'en vont tous deux avec la vitesse moyenne qu'ils avaient avant le choc, conformément au principe de la conservation de la quantité de mouvement. Si donc l'un d'eux était en repos, ils prennent la demi-vitesse de l'autre; le grand carré de la figure 43 est alors découpé en quatre carrés égaux; et l'énergie restante est la moitié de l'énergie initiale. Bien mieux, si ces deux corps se rencontrent avec des vitesses égales et opposées, ils se collent l'un à l'autre et restent en place; leur énergie cinétique a donc disparu; elle s'est en quelque sorte évanouie, nous n'en retrouvons pas la trace.

Le choc semble donc constituer, dans la mécanique, un phénomène exceptionnel; tantôt conservateur de l'énergie, dans le choc élastique, il en est un consommateur plus ou moins goulu dans tous les autres cas; dans le choc entièrement mou, il est tellement vorace, qu'il n'en laisse rien subsister.

Les physiciens ont su résoudre cette énigme, en discernant soigneusement diverses sortes d'énergie.

Le travail et l'énergie cinétique sont les deux formes que nous avons appris à connaître. Mais il en est une troisième à laquelle le choc élastique fait immédiatement penser. Lorsque deux sphères de même masse, parfaitement élastiques, se rencontrent avec des vitesses égales et opposées, un moment vient où elles s'arrêtent complètement avant de rebondir. A ce moment, elles ont accompli un travail, et ne possèdent plus d'énergie cinétique; mais ce travail n'est pas perdu; il a engendré une compression de la matière autour des surfaces de contact, et c'est dans la détente qui se produit aussitôt que les sphères retrouvent leur vitesse, et, par conséquent, leur énergie cinétique. L'énergie s'était donc cachée, mais elle était prête à reparaître; elle était, comme on dit, *en puissance*, c'est-à-dire qu'elle avait revêtu la forme *potentielle*. Ce qualificatif désigne, très généralement, toute l'énergie cachée, qui peut dégager du travail ou produire de l'énergie cinétique. Si nos wagonnets, au lieu d'écraser un ressort avaient gravi des pentes, ils auraient emmagasiné de l'énergie potentielle, qui aurait atteint sa plus grande valeur au point le plus haut de leur course. S'ils avaient été accrochés en ce point, ils auraient conservé leur énergie potentielle jusqu'à leur libération; et, à ce moment, elle se serait muée de nouveau en énergie cinétique.

L'énergie potentielle possède bien des formes diverses; un ressort tendu, une masse que l'on élève, sont les deux seules que nous ayons rencontrées. Mais un gaz comprimé, la poudre, la dynamite, tous les explosifs, contiennent de l'énergie potentielle, qui peut se dégager à un certain moment, en engendrant du travail et de l'énergie cinétique.

Une masse s'élève par sa propre vitesse; elle produit du travail, et met en réserve de l'énergie potentielle : si elle redescend au premier niveau, cette dernière reproduit toute l'énergie cinétique qui avait été consommée à la montée. Mais en même temps qu'elle s'élève ou retombe, elle peut se déplacer dans le sens horizontal, et retrouver la même vitesse ailleurs qu'aux mêmes points. Elle prendra cette vitesse toutes les fois qu'elle traversera une même surface, que ce soit en montant ou en descendant; et cette surface est ce qu'on nomme une *surface de niveau.*

Sur une surface de niveau, la masse se meut sans dépenser ni récupérer du travail; dès qu'elle en sort, sa vitesse se modifie; si elle consomme du travail, cette vitesse diminue; si elle en produit, la vitesse augmente. Dans le premier cas, l'énergie potentielle s'accroît, le corps monte; dans le second elle diminue, le corps descend.

Toutes les fois que le mouvement d'une masse s'effectue sans frottement, l'énergie potentielle et l'énergie cinétique s'échangent intégralement; ce que l'une gagne, l'autre le perd; et les quantités gagnées ou perdues sont égales à la quantité de travail fournie par la masse qui perd de la vitesse, ou absorbée par elle, tandis qu'elle en prend.

Mais que se passe-t-il dans le cas de la motte de beurre? Après le choc, nous ne retrouvons pas toute notre énergie cinétique, et il est bien difficile de penser qu'un jour le beurre se détendra pour repousser les deux masses qui se sont collées l'une à l'autre. Dans ce cas, évidemment, il y a quelque chose de perdu pour le mécanicien; mais le physicien le retrouve. Ce quelque chose, c'est de la chaleur qui s'est dégagée, et dont la quantité est toujours proportionnelle à l'énergie des deux autres formes qui a disparu. Il y a donc équivalence entre ces formes d'énergie et la forme calorifique; et, lorsqu'on l'a compris, le choc devient tout à fait limpide.

Dans tous les phénomènes qu'étudie la mécanique pratique, il y a une petite partie de l'énergie qui est transformée en chaleur; c'est le frottement qui effectue cette transformation; les physiciens disent qu'il *dégrade l'énergie*; qu'il la prend sous une forme supérieure, et la ramène à une forme vile. Il nous suffira de l'avoir signalé; l'*Initiation physique* le dira d'une façon plus complète.

CHAPITRE X

UN PEU DE RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

49. — Propriétés diverses de la matière.

Les résultats tout à fait singuliers auxquels nous a conduits notre étude du choc nous ont donné le désir de connaître un peu mieux les propriétés de la matière desquelles dépendent les forces énormes, et tout à fait insoupçonnées de la plupart des personnes, qui se dégagent au point de rencontre de deux corps durs s'abordant même avec une faible vitesse.

Les propriétés mécaniques des corps sont infiniment diverses. Si nous jetons violemment contre un mur de pierre une boule de verre, elle se brisera sûrement; une balle de caoutchouc, au contraire, reprendra entièrement sa forme; et, si nous constituons avec un peu de mie de pain frais une étoile à six branches bien pétrie (fig. 44), nous pourrons la jeter également aussi fort que nous voudrons; elle rebondira sans s'être déformée. Et pourtant, prenons-la entre deux doigts, nous l'écraserons sans peine; nous pourrons la pétrir à nouveau, lui donner toutes les formes que nous voudrons, elle les prendra, et elle les conservera lorsque nous la jetterons contre un obstacle. La balle de caoutchouc se déformera entre nos doigts, mais redeviendra sphérique dès que nous l'abandonnerons. Quant à la sphère de verre, nous pourrions presser sur elle de tout notre poids, nous ne réussirions pas à la modifier de façon appréciable, ni à la réduire en morceaux.

Fig. 44. — Une étoile en mie de pain rebondit sans se déformer.

A quoi tiennent ces différences dans la façon dont se comportent le verre, le caoutchouc ou la mie de pain? Nous aurions pu ajouter l'acier, le plomb ou le mastic, et nous aurions trouvé encore d'autres séries de propriétés. Pour débrouiller cet écheveau terriblement enchevêtré, il faut procéder par ordre; c'est ce que nous allons faire, en commençant par quelques expériences élémentaires.

50. — Limite élastique, charge de rupture, module d'élasticité.

Notre matériel sera très simple : une potence de bois suffisamment robuste, un plateau, quelques poids et des fils de métal.

Nous fixerons un fil de métal à la potence, et nous lui suspendrons le plateau (fig. 45); en même temps, nous clouerons à la potence une règle sur laquelle nous aurons collé du papier quadrillé en millimètres. Au bout du fil, nous mastiquerons une aiguille [1] qui pointera sur la division. Pour simplifier nos calculs, nous aurons donné à notre fil une longueur de 1 mètre à très peu près.

Si nous chargeons notre plateau, l'aiguille descend; en retirant les poids, nous la verrons remonter. Si nous n'avons pas soumis notre fil à une traction trop forte, l'aiguille reviendra au trait qu'elle marquait avant la charge; nous dirons alors que le fil a subi un *allongement élastique*. Mais, si nous chargeons davantage, un moment viendra où l'aiguille ne retrouvera plus, au retour, sa première

1. Pour abréger l'exposé, nous supposons l'aiguille fixée directement au fil; mais, pour avoir des déplacements bien visibles, on montera l'aiguille de manière à amplifier son mouvement.

position : le fil restera légèrement déformé; il aura subi après un allongement élastique, ce que l'on nomme un *allongement permanent*. Le moment exact où cet allongement se produit est difficile à déterminer; il commence graduellement, et si l'on fait des expériences précises, on le constate beaucoup plus tôt qu'avec des expériences grossières. Cependant, on arrive à le fixer *approximativement* sans trop de peine, et l'on dit alors que le fil a atteint sa *limite élastique*.

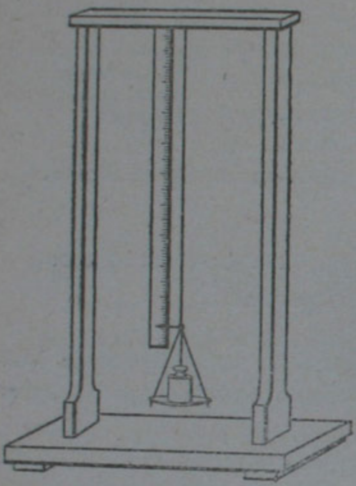


Fig. 45. — On peut étudier les propriétés mécaniques des métaux en mesurant l'allongement que subit un fil chargé d'un poids.

Puis nous pouvons continuer à charger; à un certain moment, le fil se casse; on a atteint alors la *charge de rupture*.

Les mécaniciens ont l'habitude d'évaluer la limite élastique et la charge de rupture en kilogrammes-force appliqués à un fil de 1 millimètre carré de section. Un jour viendra certainement où l'on substituera a mégadyne au kilogramme-force; mais, pour le moment, nous nous en tiendrons à la pratique usuelle.

Si l'on reste dans les limites de la déformation élastique, on peut définir une autre propriété de la matière, qui est son *coefficient* ou son *module de résistance élastique*, et que l'on appelle assez improprement son *module d'élasticité*. Les mécaniciens le définissent numériquement de la manière suivante : Prenons un fil de 1 millimètre carré de section, et chargeons-le de 1 kilogramme-force; il augmentera d'une certaine fraction de sa longueur primitive. L'inverse de cette fraction est le module de résistance élastique.

Nous pouvons maintenant suspendre à notre potence un fil d'acier, un fil de laiton, un fil de plomb et un fil de caoutchouc. Si nous faisions des mesures précises, nous trouverions d'abord que le fil d'acier, de 1 millimètre carré de section, s'allonge, pour une charge de 1 kilogramme-force, de 1/20 de millimètre environ, le fil de laiton de 1/10, le fil de plomb de 5/10 à 6/10; quant au fil de caoutchouc de même section, nous ne le chargerons pas de 1 kilogramme; 10 grammes l'allongeront déjà de 10 cm [1].

Le module de résistance élastique est donc, en nombres ronds, de 20 000 pour l'acier, de 10 000 pour le laiton, de 2 000 pour le plomb et de 0,1 pour le caoutchouc.

Il existe, comme on le voit, entre les fils de divers métaux, des différences notables dans les allongements élastiques sous une même charge; mais leur limite élastique varie dans des proportions encore plus étendues. Ainsi, pour produire un allongement permanent bien visible dans un fil d'acier très dur, comme de la bonne corde à piano, il faudra le charger de 100 à 200 kilogrammes par millimètre carré. Nous n'arriverons, avec nos faibles moyens, à déterminer cette limite qu'en étudiant un fil plus fin. Si notre fil de laiton est moyennement écroui, sa limite élastique sera d'environ 15 kilogrammes; quant au fil de plomb, on le déformera d'une manière permanente sous une charge de 500 grammes. Le fil de caoutchouc, en revanche, pourra être allongé jusqu'au voisinage de sa rupture sans cesser de revenir à sa longueur primitive. Le fil d'acier dur se brisera peu après sa première déformation permanente; le fil de laiton se cassera sous 50 kilogrammes environ; le fil de plomb bien peu au-dessus de 1 kilogramme.

Pour un même métal, le module de résistance élastique

1. Jusqu'au moment où la déformation permanente commence à se manifester, les fils métalliques s'allongent à très peu près proportionnellement à la traction (pression négative) qu'ils supportent (loi de Hooke); pour le caoutchouc, la déformation varie d'abord plus vite que l'effort, ce qui tient à la rapide diminution de la section; puis elle tend vers une limite.

varie peu, quel que soit son état; tant qu'on ne lui fait subir que de très petites déformations, on développe des réactions qui sont à très peu près les mêmes. Mais la limite élastique et la charge de rupture diffèrent considérablement suivant son état de recuit ou d'écrouissage. Le laiton, par exemple, peut être amené, par une chauffe, à un état de mollesse voisin de celui du plomb, alors qu'en le laminant, en le martelant ou en le passant à la filière, on peut relever sa limite élastique au point de permettre d'en faire des ressorts de bonne qualité, supportant de grandes déformations élastiques avant que les déformations permanentes se manifestent.

Un corps dont la limite élastique est élevée rend un son clair lorsqu'on le frappe; au contraire, si sa limite élastique est atteinte pour une faible déformation, il donne un son mat, qui s'éteint immédiatement. La raison de ce fait nous est presque évidente; nous la verrons mieux encore dans un instant.

Dans l'étude scientifique des métaux, on attache une grande importance au module de résistance élastique; au contraire, pour leur emploi dans les constructions, la limite élastique et la charge de rupture sont plus intéressantes à connaître.

51. — La flexion des barres.

L'étude faite sur les fils possède un avantage : elle est simple. En effet, toutes les parties du métal sont soumises aux mêmes actions, et ses propriétés apparaissent immédiatement. Mais on emploie plus souvent les métaux en barres, qui fléchissent sous l'action des forces. Nous allons donc chercher comment une barre se défend lorsqu'on veut la fléchir, et comment elle résiste à l'effort.

Une feuille de papier se ploie sans la moindre difficulté; nous roulons de même un cahier de papier, une brochure par exemple, avec un très petit effort; mais un morceau de carton de la même épaisseur résiste beaucoup mieux. Quelle est la différence? Dans les deux cas, nous avons la même quantité d'une même matière; mais il suffit de regarder la façon dont fléchit un cahier ou une feuille de carton, pour voir que la matière s'y trouve liée autrement : les feuilles du cahier glissent les unes sur les autres; les diverses couches du carton sont, au contraire, dans l'impossibilité de glisser. Nous aurions pu faire la même expérence avec des feuilles minces de métal, et nous en aurions conclu qu'il n'existe pas, à proprement parler, de résistance à la flexion : *la matière se laisse courber*; elle ne résiste que lorsqu'on l'empêche de glisser.

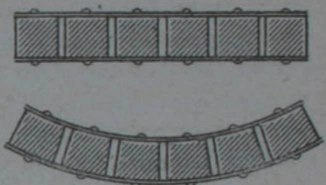


Fig. 46. — Une barre que l'on fléchit résiste parce que l'on distend ou comprime ses fibres sur ses faces opposées.

Prenons maintenant deux bandes minces de métal, que nous fléchissons sans grande difficulté, puis réunissons-les par l'intermédiaire d'une série de cales de bois sur lesquelles elles seront vissées (fig. 46). Si nous voulons fléchir l'espèce de poutre ainsi constituée, nous constatons qu'elle oppose une grande résistance à l'effort; et nous voyons sans peine que cette résistance est due au fait que nous cherchons à étendre l'une des lames, et à faire rentrer l'autre en elle-même.

Nous n'aurons rien à changer à notre raisonnement si nous considérons nos deux lames comme faisant partie d'une même barre de métal, dont la région intérieure les relie; en effet, dans une barre de section uniforme que l'on fléchit, toute la matière située dans la moitié concave est comprimée, toute celle de l'autre moitié est tendue. La surface de séparation de ces deux régions est la *fibre neutre* de la barre, et nous pouvons, en évaluant les efforts nécessaires à déformer deux bandes symétriques par rapport à la fibre neutre, découvrir les lois de la flexion des barres.

Supposons que, partant d'une barre déterminée, nous doublions toutes ses dimensions dans le plan où nous voulons la fléchir. Nos deux lames deviendront deux fois plus épaisses; elles résisteront donc deux fois plus pour une même déformation; mais, comme elles sont deux fois plus éloignées, elles éprouveront, pour une même flexion totale de la barre, des déformations deux fois plus fortes; enfin, pour cette même raison, le moment qu'elles exercent, et qui s'oppose au couple qui veut les faire tourner, est deux fois plus fort. Ainsi ce couple se trouve doublé trois fois; il est donc huit fois plus fort. Remarquons que si, sans donner aux lames une plus grande épaisseur, nous nous bornons à doubler leur distance, leur moment de flexion sera quadruplé. Nous en concluons qu'une quantité donnée de matière résiste mieux à la flexion sous la forme d'un tube que sous celle d'une tige ou d'une barre pleine. Voilà pour l'épaisseur.

Si nous augmentons la largeur d'une barre, les nouvelles couches latérales que nous ajoutons travaillent exactement comme celles qui font déjà partie de la barre; elles contribuent à sa résistance dans la proportion de la matière ajoutée, comme si l'on juxtaposait une deuxième barre à la première. Voilà pour la largeur.

Voyons maintenant comment la flèche varie avec la longueur des barres.

Notre barre étant posée sur deux appuis et fléchie par un poids posé en son milieu, nous verrons que la flèche, c'est-à-dire la différence de niveau entre les appuis et le point le plus bas de la barre, augmente rapidement lorsqu'on éloigne les points de support.

Si la barre conservait la même forme, la flèche serait proportionnelle au carré de la distance des appuis; mais elle est d'autant plus courbée que les appuis sont plus éloignés, car le poids agit avec un bras de levier proportionnel à sa distance à chacun d'eux. Pour une même valeur du poids fléchisseur, la flèche est ainsi proportionnelle au cube de la distance des appuis.

Voici donc, en somme, la loi de la flexion des barres :

Une barre posée sur deux appuis et chargée d'un poids en son milieu fléchit proportionnellement au cube de la distance *des appuis, inversement proportionnellement à sa largeur et au cube de sa hauteur.*

S'il est vrai que, comme le disait le grand géomètre Laplace, la nature se joue des difficultés d'intégration, elle n'est pas moins habile à appliquer les principes de la résistance des matériaux, que l'homme a appris à connaître par un patient labeur, après que bien des accidents lui eurent montré les dangers qu'il court en les ignorant. Nous venons de voir qu'une poutre résiste d'autant mieux à la flexion qu'on en reporte davantage la matière vers l'extérieur; pour une même dépense de matière, nos os tubulaires nous soutiennent tout autrement que s'ils étaient pleins; et le chaume, lui aussi, supporte les épis mûrs par une véritable merveille de construction mécanique.

52. — Fragilité, plasticité, dureté.

Nous avons le sentiment très net de ce que signifient ces trois termes. Mais il faut pouvoir les relier aux propriétés que nous avons étudiées par la traction des fils.

Un coup de marteau donné sur un morceau d'acier dur n'y laisse aucune trace, alors qu'il marque un morceau de cuivre ou de plomb, fait voler en éclats un morceau de verre, et réduit en poussière un morceau de grès. L'acier est résistant, le cuivre et le plomb sont plastiques, le verre est fragile, le grès est friable.

L'acier, nous l'avons vu, possède une limite élastique très élevée; il se déforme, mais revient à son état primitif; le cuivre et le plomb ont une limite élastique basse; lorsqu'ils ont été sensiblement déformés, ils gardent la trace de leur changement.

En abordant chacun des objets qu'elle a frappés, la tête du marteau possédait une certaine quantité d'énergie; cette énergie n'a pu s'annuler dans le marteau qu'en se transformant ailleurs en un travail équivalent. Le marteau frappant l'acier rebondit; la déformation du métal, qui avait absorbé pour un instant l'énergie du marteau, en l'emmagasinant sous la forme potentielle, le ramène à la forme cinétique, dans ce même marteau qu'elle a renvoyé violemment en arrière.

Dans le cuivre et le plomb, la limite de déformation permanente a été atteinte avant que le marteau eût épuisé son énergie cinétique ; il a donc continué à enfoncer, et a laissé sa marque. Le verre, enfin, n'éprouvant pas de déformation permanente, et possédant une charge de rupture relativement faible, l'énergie cinétique du marteau l'a déformé jusqu'à cette charge avant d'être épuisée ; le verre n'avait plus qu'une chose à faire, c'était de céder en se séparant. Le grès enfin se compose d'une foule de grains à l'intérieur de chacun desquels la charge de rupture est relativement élevée, ainsi que la limite élastique, mais qui sont réunis par un ciment dont la charge de rupture est très basse ; les grains se sont conservés chacun pour leur compte, mais ils se sont séparés les uns des autres.

Au travers de toutes ces propriétés, à quoi rattacher la dureté? L'acier est dur et peu fragile, le verre est fragile, mais il est dur, puisque l'acier ne l'entame qu'avec difficulté ; le laiton et le plomb ne sont certainement pas durs, car ils se déforment aisément ; mais le grès, tout friable qu'il est, possède une dureté élevée, puisqu'il sert, sous forme de meule, à affuter les outils en acier dur, à aiguiser les couteaux ou les ciseaux, etc.

Pour qu'un corps soit dur, il faut certainement que sa limite élastique soit élevée ; cela ressort avec évidence de ce qui précède. Si, en même temps, sa charge de rupture est élevée, il est dur et tenace ; si sa charge de rupture est de moyenne valeur, il est dur et fragile.

La constitution du grès lui confère des propriétés bizarres et paradoxales. Tandis qu'il attaque les outils dans l'opération de l'affutage, on peut tourner une meule de grès avec une simple queue de lime.

C'est que le mode d'action du métal sur la meule de grès est bien différent dans les deux cas. Dans l'affutage, on n'impose au ciment que de très faibles efforts, auxquels il puisse résister ; chaque grain attaque l'acier en glissant sur lui très obliquement, et en le refoulant si l'on appuie trop fort; au contraire, pour tourner la meule, on arc-boute la lime, d'une part sur l'auge de la meule, d'autre part dans les creux de celle-ci, de manière à produire de grands efforts sur le ciment; on n'use pas les grains, on fait sauter de petits éclats, pour les mêmes raisons que l'on réduit en miettes un morceau de grès d'un coup de marteau.

Les grains de grès attaquent le métal même lorsqu'ils ne sont pas réunis par le ciment; dans les cuisines, on polit les casseroles à la poudre de grès dont on enduit un chiffon; et, dans les fonderies, on écroûte les pièces de métal au moyen d'un jet de sable lancé par une pompe.

Le sable dur, quartzeux, chassé par le vent, attaque les vitres et les dépolit. C'est même ainsi que, pendant la guerre de sécession, un officier américain, constatant l'opacité des vitres de sa cahute, fut conduit à imaginer la fabrication des objets en verre dépoli, qui eurent beaucoup de succès il y a quelques années.

Voici, à ce propos, une expérience qui peut paraître paradoxale : Si l'on fixe sur une plaque de verre une fine dentelle, elle la protège, de telle sorte que le jet de sable ne l'attaque que dans les intervalles des fils; tout le dessin de la dentelle apparaît alors en transparence sur le reste de la glace, simplement translucide.

Toute difficulté s'évanouit si nous songeons aux conditions dans lesquelles se produit le choc des grains de sable contre la dentelle et contre le verre. Chaque grain de sable possède, lorsqu'il rencontre un obstacle, une certaine quantité d'énergie cinétique qu'il doit transformer en une autre forme de l'énergie; la dentelle cède sur un chemin considérable, et l'effort reste très minime. Au contact du verre, le grain est arrêté sur un très faible parcours, et l'effort devient très grand. Ainsi, les parcelles de verre sont arrachées de sa surface. L'énergie du choc est trop faible pour provoquer la rupture de toute la glace; l'effort total est infime à chaque instant, mais la pression, qui s'exerce sur un espace extrêmement restreint, peut devenir énorme; le verre se brise, mais la rupture reste très limitée

53. — Rupture statique, rupture par choc.

Les phénomènes que nous venons d'étudier sont d'une nature assez complexe, et il se peut que quelques-unes de leurs particularités soient restées obscures dans l'esprit de nos lecteurs. C'est pourquoi de nouvelles expériences destinées à les élucider pourront n'être pas inutiles.

Nous fixerons d'abord, à un robuste étau, une longueur de 1 mètre environ d'une corde à piano d'un diamètre égal ou inférieur à 0,3 millimètre, et nous pincerons son extrémité inférieure dans un étau à main, après avoir engagé sur le fil un vieux poids de 100 grammes. Nous élèverons alors le poids, et le laisserons tomber d'une hauteur de plus en plus grande, jusqu'à ce que le fil se brise : nous devrons provoquer la rupture lorsque la chute sera de 80 à 90 centimètres.

Nous pincerons ensuite l'étau à main au bout du reste du fil, et lui suspendrons des poids, après avoir disposé au-dessous quelques planches pour amortir leur chute. La rupture du fil devra se produire lorsque l'étau à main sera chargé de 15 kilogrammes environ ; et, si le fil était encore suffisamment long, nous aurons pu constater que, peu avant sa rupture, il avait augmenté de 1/100 environ de sa longueur primitive.

Pour passer à un autre extrême, nous pouvons recommencer l'expérience avec un fil de caoutchouc, mais nous la ferons dans l'ordre inverse ; c'est-à-dire que nous déchirerons notre fil sous une charge statique, qui sera, par exemple, de 200 grammes ; en le faisant, nous constaterons qu'il a presque sextuplé de longueur, et nous saurons quelle longueur de fil nous pouvons soumettre à l'expérience de choc, suivant l'espace dont nous disposons.

Si nous pouvions penser que les conditions sont en quelque mesure analogues à celles qui accompagnent la rupture du fil d'acier, nous commencerions prudemment par faire tomber un poids de 10 grammes. Mais nous avons déjà le sentiment que le caoutchouc résiste beaucoup mieux au choc; cependant notre surprise sera grande lorsque nous verrons que, pour casser notre caoutchouc, il faut arriver très près d'un poids de 100 grammes, tombant de toute la longueur du fil.

Voilà donc une constatation bien singulière; pour rompre notre fil d'acier par une charge statique, nous avons dû la prendre 150 fois plus grande que la charge de rupture après une chute de moins de 1 mètre; et, pour briser notre fil de caoutchouc, la charge statique a été bien juste le double de la charge tombante.

Cherchons à expliquer ce résultat, qui peut paraître paradoxal.

Chacun de nos fils s'est brisé lorsque l'effort, instantané dans le choc, durable dans l'action statique, a atteint sa charge de rupture. Cette charge était de 15 kilogrammes pour le fil d'acier : c'est-à-dire que, sur l'espace de 1 centimètre dont le fil s'est allongé, il a développé des efforts qui sont allés en croissant, depuis 0 jusqu'à 15 kilogrammes. On a donc imposé au fil un travail représenté par la surface du triangle ABC (fig. 47), soit 15/2 kilogrammes-force-centimètres, et c'est lorsque l'énergie du choc a un peu dépassé cette grandeur, que le fil d'acier a atteint son allongement de rupture.

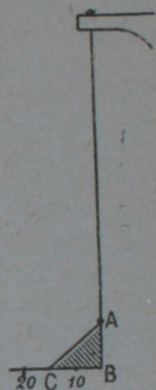


Fig. 47. — **Dans la rupture par choc, un fil métallique commence par emmagasiner l'énergie cinétique du corps qui le frappe.**

Un fil de caoutchouc, au contraire, peut subir, avant de se rompre, ainsi que nous l'avons vu, un allongement quintuple de sa longueur primitive. Lorsque la charge statique a rompu sous 200 grammes un fil de 1 mètre de longueur initiale il avait supporté au préalable, sur un parcours de 5 mètres, des efforts allant en croissant de 0 à 200 grammes. Le travail était donc de $\frac{0{,}2 \times 500}{2} = 50$ kilogrammes-centimètres, et c'est ce travail que notre poids a dû effectuer avant de provoquer la rupture du fil[1]. Étant donné l'allongement énorme du caoutchouc, il était, d'ailleurs, à peu près indifférent de poser le poids doucement sur l'extrémité du fil, prise dans une toute petite pince, ou de le laisser tomber de quelques décimètres; l'énergie cinétique gagnée dans cette chute préalable était peu de chose dans l'ensemble du travail dépensé par la pesanteur sur le poids tombant.

Il est intéressant de remarquer que la rupture statique du fil de caoutchouc a été réalisée avec un effort 75 fois moindre que celle du fil d'acier; mais que l'énergie nécessaire à la rupture par choc était près de 7 fois plus forte; suivant le mode d'appréciation des mérites relatifs de l'acier et du caoutchouc, on pourra donc les exprimer par des nombres dont le rapport variera de 1 à 500 environ. Cet exemple montre à l'évidence que le mode d'essai des matériaux doit être parfaitement défini, si l'on veut pouvoir attribuer, aux nombres qui évaluent leurs qualités, une signification quelconque.

Nous comprendrons aussi, sans qu'il soit besoin d'insister, que notre fil d'acier aurait beaucoup mieux résisté au choc, s'il avait été fixé à la potence par l'intermédiaire d'un fil de caoutchouc. Assurément, pour que celui-ci résistât à la charge statique, il aurait fallu lui donner une forte section; mais il aurait servi, dans la seconde expérience, à emmagasiner l'énergie du poids tombant; il aurait prévenu la rupture.

Pour un effort statique, la charge de rupture est évidemment à peu près indépendante de la longueur du fil. Elle en serait rigoureusement indépendante si le fil ne pesait

1. Nous supposons, pour la simplicité du calcul, que la réaction du fil de caoutchouc est proportionnelle à son allongement. Mais nous avons vu que les phénomènes se passent un peu différemment dans le cas du caoutchouc. Nos lecteurs pourront se donner pour objectif de déterminer, par l'expérience, les éléments du problème; ils traceront d'abord le diagramme des allongements sous une charge statique, puis réaliseront la rupture par choc. L'énergie juste suffisante pour produire la rupture devra être représentée par la surface embrassée par les allongements et les efforts. Cette expérience, exécutée avec soin, est très instructive.

rien, et s'il était parfaitement homogène; mais plus il est long, plus il y a de chances qu'il renferme quelque partie faible, pour laquelle la charge de rupture soit un peu plus basse que celle de la moyenne des autres sections. Pour une charge en mouvement, au contraire, le fil résistera d'autant mieux qu'il sera plus long, puisque la quantité d'énergie qu'il peut faire passer de la forme cinétique à la forme potentielle est proportionnelle à sa longueur.

Poussons tout à l'extrême : un fil très court devrait se rompre pour une énergie de choc très faible. Si nous réduisions notre fil d'acier à 1 millimètre de longueur, il devrait suffire de laisser tomber sur lui un poids de 100 grammes d'une hauteur de 0,8 mm environ pour le briser. Mais l'expérience ne confirmerait pas cette conclusion d'un calcul qui, pourtant, paraît exact. C'est que, dans ce cas, la flexion de l'étau, celle de la pince fixée au fil, la déformation des corps au contact ne seraient plus négligeables; toutes ces déformations transformeraient de l'énergie cinétique en énergie potentielle, et viendraient en aide au fil dans sa défense contre le choc.

Nos jeunes élèves tireront, de ces remarques, toutes les conclusions qu'elles comportent; qu'ils regardent autour d'eux et observent tous les chocs possibles, partout ils verront se développer des efforts considérables; et, si ces efforts ne sont pas plus souvent destructeurs, c'est que, autour du point frappé, toutes les matières cèdent un peu, augmentent le chemin parcouru et diminuent en conséquence l'effort au fond du choc. Ils comprendront plus parfaitement la science de l'emballeur; ils saisiront mieux aussi le vrai sens de cet aphorisme de Galilée : « La force vive est toujours infiniment plus grande que la force ». Lorsque nous l'avons rencontré au § 23, nous ne pouvions pas en comprendre encore la portée; et même après avoir appris à connaître les relations qualitatives, nous eussions pu être tentés de le rejeter, tant sa forme devait nous paraître bizarre. Maintenant, nous savons ce que le génie pénétrant de Galilée lui avait permis de deviner : si les corps étaient rigoureusement indéformables, le plus faible choc développerait à leur surface des efforts illimités.

Ces considérations ont une grande importance ; lorsqu'on ne les a pas saisies, on comprend très difficilement la façon dont les principes de la mécanique s'appliquent au monde matériel. Pour la rendre plus aisément intelligible, on simplifie la mécanique à l'extrême; on crée des êtres de raison qui sont d'une part les forces, de l'autre les points matériels; puis on les associe et on met au jour des résultats parfaitement exacts appliqués à ces êtres fictifs, mais qui sont, le plus souvent, en flagrant désaccord avec ce que nous révèle la réalité. Entre deux s'intercalent les déformations de la matière, qui transforment au point de les rendre méconnaissables les phénomènes tels que les décrit la science simplifiée constituant comme le squelette de la mécanique vraie.

54. — La conservation de la quantité de mouvement et l'amortissement des chocs.

Il est de pauvres hères qui gagnent leur vie à se laisser frapper à tour de bras, et, comme la femme de Sganarelle, veulent bien être battus. Entendons-nous ; ils ne reçoivent pas les coups directement sur la peau, mais par l'intermédiaire d'une enclume posée sur leur ventre, et sur laquelle un camarade donne de grands coups de merlin à assommer les bœufs. L'hercule porteur de l'enclume repose sur le sol par ses pieds et ses mains, et relève tant qu'il peut le torse, formant ainsi, par tout l'ensemble des membres et du tronc, une sorte de berceau élastique, qui fléchit légèrement à chaque coup, et consomme l'énergie que lui transmet l'enclume. Mais nous sentons bien que cette flexion ne suffirait pas à emmagasiner toute l'énergie du merlin, et qu'il y a encore autre chose là-dessous.

Expérimenter sur un homme n'est pas toujours facile; nous arriverons plus directement au but en simplifiant le problème, et en remplaçant notre saltimbanque par le fil d'acier qui nous a déjà appris tant de choses.

S'il nous en reste de notre dernière bobine, nous en couperons un morceau de 1 mètre, que nous chargerons d'un poids de 5 kilogrammes; puis nous ferons tomber d'une hauteur croissante le poids de 100 grammes qui avait provoqué sa rupture par choc. Cette fois, le fil résistera; et pourtant, à l'énergie de la chute, nous avons ajouté une tension initiale qu'il eût suffi de tripler pour voir le fil se casser.

Pour comprendre ce paradoxe, il faut analyser le détail du phénomène; d'abord le choc : là, nous le savons, un effort considérable est produit; mais il est de très courte durée, et ne peut donner à la masse suspendue qu'une brève impulsion; celle-ci se met en mouvement; mais, avant que le fil ait pu se déformer d'une quantité appréciable, le choc est depuis longtemps terminé.

Dans le choc, une chose se conserve, c'est la quantité de mouvement; elle est la même au moment où la masse tombante m aborde la masse fixe M et à l'instant, immédiatement postérieur, où ces deux masses ont pris une vitesse commune. Cette vitesse v' est égale, dans notre cas, à $\frac{M+m}{m} = \frac{1}{51}$ de la vitesse v de la petite masse; l'énergie, qui est égale au demi-produit $(M+m)\frac{v'^2}{2}$ de la masse totale par le carré de cette nouvelle vitesse, est 51 fois plus faible qu'avant le choc; elle correspond à l'énergie de la petite masse, tombant seulement d'une hauteur de $\frac{1\text{m}}{51}$, ou 20 millimètres environ; elle est donc à peu près négligeable, et ne produit qu'une augmentation insignifiante de l'allongement du fil.

S'il s'agit d'une simple démonstration, et non d'une mesure, nous pouvons couper deux morceaux de ficelle dans la même pelote, en pincer un à un étau (fig. 48), lui suspendre une boule, et attacher l'autre morceau à celle-ci. Si nous tirons lentement sur ce dernier, nous devrons casser l'autre, puisqu'à notre effort s'ajoute le poids de la boule; au contraire un coup sec cassera la ficelle inférieure.

Cette expérience est intéressante à un autre point de vue : si la boule produit des effets inverses, c'est que, dans le premier cas, elle agit par son poids, dans le second par sa masse. Ainsi, le poids et la masse ne sont pas seulement séparables; leurs effets peuvent être opposés.

Fig. 48. — Une traction lente casse la ficelle supérieure, un coup sec la ficelle inférieure. Dans le premier cas, la boule agit par son poids; dans le second, par sa masse.

A moins d'être un ancien ingénieur tombé dans la misère, notre saltimbanque n'a probablement aucune idée ni de l'énergie cinétique du merlin, ni de la conservation de la quantité du mouvement, ni de l'absorption du travail, ni de la pression; mais il a sans aucun doute l'intuition bien nette de ce que peut produire une application rationnelle des principes de la mécanique. La base de l'enclume répartit sur une large surface l'effort total; l'enclume réduit à une fraction infime l'énergie cinétique dont notre homme doit supporter le choc, et ce petit reste est emmagasiné dans le coussin qu'il forme avec le tronc et les membres.

Il a certainement quelque mérite à supporter une enclume sur son ventre; mais, pour les coups de merlin, il les sent si peu qu'il ne vaut presque pas la peine d'en parler.

On fait, dans la construction des ouvrages, des applications de ces principes dont l'utilité dépasse celle de l'expérience qu'a imaginée quelque pauvre diable pour trouver sa subsistance; on combine judicieusement la résistance de la matière avec sa capacité d'absorption de l'énergie, pour lui permettre de résister aux chocs auxquels elle pourra être soumise.

55. — Vitesse de transmission dans la rupture par choc.

Lorsqu'une balle de fusil traverse une cible de toile, un spectateur très attentif ne peut pas observer le moindre frémissement de l'étoffe; une pierre bien lancée et qui la crève produit au contraire un mouvement de la toile qui s'étend jusqu'au cadre, et peut même ébranler celui-ci. De même, une pierre fait voler en éclats une vitre, dans laquelle une balle n'aurait fait qu'un petit trou juste suffisant pour lui livrer passage.

Nous comprenons que la grande différence des effets de la pierre et de la balle tient à ce que celle-ci se déplace beaucoup plus vite que la première. Cette différence des vitesses détermine un certain nombre d'actions superposées; mais parmi elles, il en est une qui est prépondérante : c'est la vitesse de transmission des efforts et des mouvements dans les corps frappés, comparée à la vitesse avec laquelle ils sont abordés par les corps en mouvement.

En revenant à notre fil d'acier, nous comprendrons qu'il doive en être ainsi. En effet, lorsque nous avons calculé l'énergie qu'il pouvait absorber dans le cas d'un choc longitudinal, nous avons admis que l'effort était transmis instantanément dans toute l'étendue du fil, de telle sorte que chacune de ses parties contribuât également à transformer l'énergie cinétique en énergie potentielle. Mais cela n'est très approximativement vrai que si le choc n'est pas très rapide, et si le fil n'est pas très long. Lorsqu'on donne un brusque allongement à un fil d'acier, le mouvement gagne de proche en proche, avec une vitesse un peu supérieure à 5 kilomètres par seconde; si donc le choc ne durait qu'un millième de seconde, les 5 premiers mètres d'un fil d'acier participeraient seuls à l'absorption de l'énergie cinétique, et tout le reste du fil serait indifférent.

L'opposition dans l'action d'un effort brusque et d'un effort statique ressort encore avec évidence d'une modification de l'expérience (fig. 48); au lieu de séparer la ficelle en deux par la boule, on pourrait opérer sur une ficelle très longue; un effort lent la casserait dans le haut, un choc brusque dans le bas. La raison en est dans la lenteur de la transmission de l'effort; et l'analogie avec la précédente expérience nous fait comprendre que, si cette transmission n'est pas instantanée, c'est parce que chaque élément du fil agit comme la boule: il ne peut propager l'effet du choc qu'en se mettant en mouvement, ce qui exige un certain temps.

Les effets de la rapidité des actions mécaniques ne sont pas sensibles seulement sur les corps solides; les liquides ou les gaz donnent lieu à des observations tout aussi curieuses. Une pierre ou une balle de fusil ricoche lorsqu'elle est lancée obliquement à la surface de l'eau, alors qu'elle enfoncerait si elle avait le temps de se poser. Un puissant jet d'eau se comporte comme un ressort à l'égard d'une canne dont on le frappe; et, si la vitesse du jet augmente encore, on aura quelque peine à l'entamer avec un sabre.

Un mince cordon de dynamite entourant le pied d'un arbre suffit pour l'abattre, tandis qu'une forte charge de poudre disposée de même sera sans aucun effet. La différence dans le mode d'action réside dans le fait que la déflagration de la poudre est relativement lente, tandis que celle de la dynamite est extrêmement brusque. L'air ambiant cède à la première, qui le pousse sans brutatité, tandis qu'il forme bourrage, et se comporte à peu près comme un corps solide vis-à-vis des gaz qui résultent de la déflagration de la dynamite.

L'étude de ces phénomènes présente un intérêt puissant, mais nous entraînerait trop loin. Il nous suffira d'avoir amené nos lecteurs au seuil de cette étude, et de leur avoir donné l'envie de la poursuivre. Si de plus cette *Initiation* les a préparés à comprendre ces actions délicates, c'est que nous aurons fait beaucoup de chemin depuis que l'étude de la chute des corps nous amenait à deviner l'action des forces.

CHAPITRE XI

UN PEU D'ARTILLERIE

Dès le début de son développement, la mécanique a tiré un grand profit de l'examen des questions que soulève le mouvement des projectiles ; les efforts considérables mis en jeu pour leur communiquer leur vitesse, ceux non moins grands auxquels ils donnent naissance lorsqu'ils frappent des obstacles, l'étendue qu'ils parcourent librement, tout cela devait frapper vivement l'esprit des mécaniciens d'autrefois ; quant à nous, qui bénéficions de leur labeur, nous pouvons encore utiliser avec grand avantage, pour éprouver la solidité de nos connaissances en dynamique, les instants très courts pendant lesquels un projectile obéit à sa destinée.

56. — Conditions générales du tir d'un projectile.

La déflagration de la poudre produit une grande quantité de gaz, portée à une température élevée, et qui engendre une pression très forte. Les parois de la chambre de chargement, la culasse et le culot de l'obus sont soumis à cette pression d'une façon uniforme, à cela près que l'obus, filant avec les gaz dont la vitesse d'écoulement n'est pas infinie, crée derrière lui comme un vide relatif. C'est l'obus que l'on voudrait pousser le plus, et c'est lui qui l'est en somme le moins; mais la différence n'est pas très considérable, et nous pourrons n'en pas tenir compte. Les parois résistent le plus souvent; quant à la culasse, elle entraîne la bouche à feu, qui recule sur des glissières dans les pièces modernes, et entraînait son affût dans l'ancienne artillerie.

Les gaz de la poudre sont projetés au dehors en même temps que l'obus; leur masse est faible, et nous pourrons aussi la négliger, puisqu'il s'agit non de faire un calcul précis, mais de nous rendre compte, en gros, de la marche des phénomènes.

Dans les limites d'approximation de cette hypothèse, l'impulsion sur la bouche à feu sera la même que sur l'obus, puisque l'effort (produit de la pression par la section de la chambre de chargement) est le même, ainsi que la durée de l'action. Les accélérations sont donc, à chaque instant, inversement proportionnelles aux masses, et les quantités de mouvement des deux mobiles sont toujours égales.

Quant au travail effectué sur chacun des deux éléments mobiles, obus et canon, et absorbé par eux, il est inversement proportionnel à leurs masses respectives, puisque le chemin parcouru sous l'action de la même force est lui-même inversement proportionnel à la masse. C'est la raison pour laquelle l'obus est destructeur, tandis que la pièce ne l'est pas, au moins en général.

Toutes les parties de la bouche à feu doivent être rigoureusement solidaires, afin de prendre toutes ensemble la même accélération et d'éviter les chocs. Celles qui sont directement actionnées par les gaz de la poudre doivent être fortement appuyées les unes contre les autres, sous peine de devenir, à l'intérieur de la bouche à feu, des projectiles destructeurs.

On pourrait empêcher la pièce de reculer, mais il faudrait la douer, pour cela, d'un frein susceptible d'exercer un effort égal au maximum de celui que produisent les gaz de la poudre, et nous verrons bientôt que sa valeur est énorme. Il est beaucoup plus sage de laisser la propre masse de la pièce développer la réaction que lui permet son accélération, réaction égale et directement opposée à l'action des gaz; ensuite on reprend, sur une étendue aussi grande qu'on le peut, l'énergie cinétique de la pièce, et on l'absorbe dans le travail du frein.

L'étude d'un exemple pris dans la pratique de l'artillerie donnera à ces indications beaucoup plus de netteté.

57. — Le tir réel.

L'ancienne pièce française de campagne, de 80 millimètres de calibre intérieur, va nous servir de type pour notre étude. Dans cette pièce, le projectile parcourt dans l'âme une longueur de 171 centimètres, et acquiert ainsi une vitesse de 490 mètres par seconde.

Nous commencerons par nous éloigner un peu de la réalité, afin de voir plus clair dans le calcul, que nous corrigerons ensuite. Nous supposerons que, sur la totalité de son parcours dans la bouche à feu, le projectile soit soumis, de la part des gaz, à un effort constant; nous ferons abstraction des frottements, et arriverons à ce résultat, fictif assurément, mais simple, que le projectile possède une accélération constante. Désignant par a cette accélération, par t la durée du parcours du projectile dans l'âme, nous pourrons écrire :

$$1{,}71 = \frac{at^2}{2} \quad \text{et} \quad 490 = at.$$

Ces deux équations conduisent, en arrondissant les nombres, aux résultats suivants :

$$a = 72\,000 \, \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}, \quad t = 0{,}007 \text{ sec.}$$

Si nos hypothèses étaient conformes à la réalité, la durée du trajet du projectile serait donc de 7 millièmes de seconde, et la force à laquelle il est soumis serait égale à 7300 fois son poids environ, quotient de 72 000 par 9,81; c'est-à-dire que chaque gramme de sa matière ferait subir, à l'élément qui le pousse, un effort de réaction égal à 7,3 kilogrammes-force.

Mais, dans la réalité, les choses se passent d'une façon sensiblement différente, qui dépend de la vitesse avec laquelle se produit la déflagration de la poudre et le dégagement des gaz.

Ce que l'on cherche à obtenir avant tout, c'est une grande vitesse du projectile; mais, en même temps, il est essentiel que la bouche à feu ne soit pas soumise à des efforts susceptibles de la faire éclater; on reste donc enfermé entre ces deux limites, et la science du constructeur de canons, associée à celle de l'ingénieur des poudres,

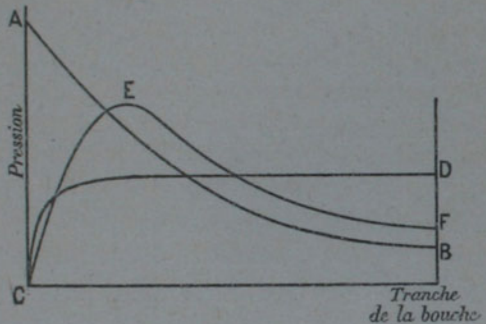


Fig. 49 — L'effet balistique et l'effet brisant dépendent du développement de la pression dans une arme à feu.

devra consister à réaliser des conditions telles que la pratique les satisfasse le plus complètement possible.

La plus grande vitesse sera obtenue lorsqu'on aura emmagasiné dans le projectile le plus grand travail; or ce dernier étant représenté par la surface embrassée par la courbe tracée sur les parcours comme abscisses et sur les efforts (pressions $\times$ section) comme ordonnées, on devra rendre la surface de cette courbe aussi grande que possible.

Nous pouvons maintenant envisager deux cas limites. Le premier est celui où la combustion de la poudre se produit instantanément, à l'instant précis où la cartouche-amorce lui communique le feu. Alors, la pression se développe subitement, et atteint toute sa valeur CA (fig. 49) avant que le projectile ait subi le moindre déplacement. Puis celui-ci se met en mouvement, et agrandit l'espace derrière lui ; alors la pression baisse d'une manière continue, jusqu'au moment où le projectile quitte la bouche à feu, et où les gaz se dégagent dans l'atmosphère. Les pressions sont représentées par la courbe AB. Pour que la surface de cette courbe soit suffisante, il faut que son point initial, A, soit très élevé au-dessus de l'axe des abscisses, c'est-à-dire que la pression initiale soit énorme. La bouche à feu subit alors de très grands efforts, auxquels elle ne résiste que si elle est très épaisse. La poudre produit des effets destructeurs immédiats, ce qui lui fait donner le qualificatif de *brisante*. Sa puissance balistique, en revanche, est médiocre, et l'on évite son emploi dans l'artillerie.

Supposons, au contraire, une poudre dont la déflagration se produise lentement, de manière à alimenter régulièrement la pression pendant tout le parcours du projectile. Après une période initiale d'ascension de la pression, d'une durée appréciable, mais représentée en fonction du déplacement du projectile par un très petit segment de la courbe CD (puisque le projectile se meut très lentement au début), la courbe reste à peu près horizontale, et le projectile est soumis à un effort constant. Pour une même surface totale embrassée par cette courbe CD, l'ordonnée maxima est aussi basse que possible ; c'est la poudre idéale au point de vue de la conservation du matériel ; et cependant, cette poudre ne pourrait pas être recommandée. En effet, au moment où le projectile quitte la bouche, il resterait encore, dans les gaz de la poudre, une énergie potentielle considérable, et le tir deviendrait, dans ces conditions, un véritable gaspillage d'énergie.

La vérité est, comme le plus souvent, *in medio* : poudre progressive, dont la déflagration se développe régulièrement, et qui continue à alimenter la pression, tandis que le projectile a déjà effectué un certain parcours dans la bouche à feu ; puis, la combustion étant terminée, la détente des gaz s'opère de manière à ce que leur énergie soit utilisée, et qu'au moment du départ du projectile, on ne rende à la liberté que des gaz ayant consciencieusement rempli leur devoir. La courbe normale des pressions est de la forme générale CEF. Le maximum de la pression est atteint lorsque le projectile a parcouru, dans l'âme de la bouche à feu, un espace égal à plusieurs fois la longueur de la chambre de chargement, et la pression maxima est abaissée dans la même proportion.

Revenons au canon de 80 millimètres. Son projectile possède une masse de 5,6 kg; l'effort moyen qu'il supporte serait égal à $5{,}6 \times 7300 = 41\,000$ mégadynes sensiblement, si cet effort était constant. Mais nous venons de voir qu'il n'en est pas ainsi; l'effort maximum est beaucoup plus considérable que l'effort moyen, et, dans le cas actuel, il dépasse certainement celui qu'exerce sur son support un poids de 100 tonnes.

On pourrait se figurer très simplement le jet des projectiles produit au moyen d'un levier à bras très inégaux, dont l'un, le plus court, serait horizontal, alors que l'autre serait approximativement vertical : quelque chose comme un renvoi de sonnette. Au bras horizontal, on suspendrait un poids considérable, qui lui communiquerait une accélération de l'ordre de celle de la pesanteur, tandis que l'autre tiendrait, à son extrémité, un projectile logé dans une cavité légèrement inclinée, et qui prendrait sa vitesse par la chute du poids moteur.

C'est à peu près de cette façon que l'on procédait autrefois, avant l'invention de la poudre, alors que l'on attaquait les villes au moyen de catapultes. Le levier n'était pas monté sur un pivot, comme celui que nous venons de décrire; il était pris dans une sorte de lien que l'on tordait, et qui ajoutait puissamment son couple à l'action du poids moteur. Un semblable système serait peut-être encore employé aujourd'hui, si l'on n'avait à compter sur les propriétés de la matière ; si, en particulier, on pouvait constituer des leviers d'une parfaite rigidité, et à peu près dénués de masse ; mais il n'en est pas ainsi : le levier de rigidité suffisante pour transmettre au projectile une accélération lui donnant la vitesse désirée aujourd'hui, devrait avoir une masse incomparablement plus grande que celle du projectile lui-même; c'est à lui donner sa vitesse que serait employée en plus grande partie le travail produit par la chute du poids, et qu'il faudrait ensuite absorber; et c'est pourquoi les catapultes ont définitivement vécu.

A mesure que l'on augmente le calibre des pièces d'artillerie, il faut augmenter leur longueur, pour la raison très simple que, la masse du projectile croissant comme le cube de ses dimensions, alors que la surface du culot n'augmente que comme leur carré, il faut, si l'on ne veut pas dépasser une même pression, laisser agir celle-ci sur un plus long parcours, afin de retrouver une surface embrassée proportionnelle à la masse. A même vitesse finale, et pour des conditions analogues de mise en vitesse, la durée du trajet dans l'arme est, comme on le voit aisément, proportionnelle à la longueur du parcours dans le canon. Il faut donc que la durée de la déflagration soit proportionnelle au calibre, si l'on veut réaliser des conditions semblables dans les grandes pièces et dans les petites pièces. On y parvient en employant, pour de gros canons, de la poudre à gros grains, dont la surface d'attaque est faible relativement à leur masse. On ne soupçonnera donc pas les artilleurs, dans leur préoccupation de proportionner la grosseur du grain à celle du canon, d'avoir obéi à l'instinct trop rudimentaire du célèbre colonel, qui voulait donner les gros instruments aux gros hommes, et s'indignait de voir un gaillard puissant souffler dans un fifre.

58. — Autour du projectile.

L'effort maximum qu'exercent les gaz de la poudre à la fois sur le culot du projectile et sur la culasse de la bouche à feu, est, comme nous l'avons vu, trop considérable (100 tonnes dans les pièces de campagne) pour que l'on cherche à s'y opposer. On le laisse tout simplement donner son recul à la pièce, que l'on arrête ensuite sur un parcours suffisamment long. La masse de la pièce complète est pratiquement 200 fois plus forte que celle de l'obus; la vitesse qu'elle prend est donc 200 fois moindre. Lorsque, au bout d'un temps qui est, pour les pièces de campagne, de l'ordre du centième de seconde, l'obus a parcouru toute la longueur de la bouche à feu, la pièce a reculé de moins de 1 centimètre, et le travail accompli pendant ce déplacement est ensuite absorbé sur une longueur qui peut être facilement 200 ou 300 fois plus considérable. L'effort est donc réduit dans la même proportion, et devient très praticable.

Autrefois, la pièce tout entière reculait sur le sol. Aujourd'hui, toutes les pièces sont constituées par deux éléments indépendants, la bouche à feu et l'affût, reliés par un organe élastique, qui permet à la première de reculer sur une glissière, et la ramène en batterie par l'action des ressorts récupérateurs; l'écoulement d'un liquide visqueux, d'un cylindre dans lequel se meut un piston relié à la bouche à feu, transforme de l'énergie sans la faire passer à la forme potentielle. En somme, le propre des freins actuels est de faire un tri judicieux dans l'énergie cinétique que leur abandonne la bouche à feu. La portion nécessaire pour ramener celle-ci en position de tir est accumulée dans des ressorts; le reste est dégradé par le frottement d'un liquide. C'est grâce à cette combinaison, dont la réalisation présentait de très grandes difficultés pratiques, que l'on est parvenu à créer toute une artillerie dont le tir est très rapide, parce que le canon ne se dépointe plus, comme lorsque le mouvement de recul se produisait par glissement sur le sol.

Si l'affût est solidement amarré, il peut maintenant rester immobile. S'il est placé sur un navire, quel que soit le mode de recul, l'action sur l'ensemble du bâtiment est la même ; le navire tout entier recule avec une vitesse qui est à celle du projectile dans le rapport inverse de leurs masses. Par exemple, un projectile de 305, pesant 440 kg, lancé à la vitesse de 830 m/sec de la tourelle d'un cuirassé de 20 000 tonnes, repousse le navire avec une vitesse de 2 cm/sec environ.

Si le projectile pouvait, sans rien perdre de sa vitesse, atteindre un cuirassé semblable à celui d'où il est parti, il lui communiquerait une vitesse égale à celle qu'a prise le premier cuirassé. Mais, à l'endroit du choc, il produirait de bien autres dégâts que n'en a causé le recul du canon; car, en même temps que de la quantité de mouvement, il a emporté de l'énergie qui, de la forme cinétique, passe à la forme travail, et nous avons vu que l'énergie du projectile est incomparablement plus grande que celle du canon.

L'effort entre un projectile et une cuirasse est prodigieusement grand. L'obus, qui a pris sa vitesse par exemple sur un parcours de 12 mètres, la restitue sur 2 à 3 décimètres. L'effort est donc 40 à 60 fois supérieur à celui que le projectile a subi de la part des gaz de la poudre, et atteint l'ordre d'une dizaine de mille tonnes; mais il dure un temps très court, et c'est pourquoi le navire, tout en éprouvant une forte secousse locale, subit un mouvement d'ensemble beaucoup moindre que s'il avait été abordé, même très doucement, par un autre bâtiment, qui n'aurait laissé aucune trace locale appréciable de son contact.

L'égalité que nous avons supposée entre la vitesse de départ et la vitesse d'arrivée du projectile est naturellement une fiction. Si ténu qu'il soit, l'air absorbe et disperse une fraction importante de son énergie de translation, en partie par des ondes bien constituées, susceptibles de se réfléchir sur les surfaces solides, comme le montre la figure 2 (p. 14), en partie dans les remous dont est rempli le sillage du projectile. Ce sont les ondes régulières qui transmettent à notre oreille le claquement par lequel un obus ou une balle passant à grande vitesse signale son passage.

Les effets locaux et les effets généraux du choc d'un projectile sont bons à méditer si l'on veut comprendre ce qui, dans la rencontre de deux corps, appartient à l'énergie cinétique, et ce qui est le fait de la quantité de mouvement. Les mêmes questions se retrouvent partout : un coup de cravache sur la peau produit une douleur cuisante; au travers d'un ample vêtement, on le sent à peine. Un coup d'un lourd bâton n'est guère plus désagréable s'il est direct que s'il est donné au travers du vêtement, à moins toutefois qu'il ne rencontre un os peu recouvert de chair; alors, c'est le choc proprement dit qui reparaît, avec toutes les conséquences de l'arrêt d'une masse sur un faible parcours.

Les effets de l'énergie cinétique et ceux de la quantité de mouvement sont toujours superposés; mais on peut isoler ce qu'ils ont de plus apparent pour nous en disant : un corps de faible masse en frappant un autre à grande vitesse produit des effets d'énergie; un corps de grande masse avançant à faible vitesse intervient par sa quantité de mouvement. L'énergie se conserve en se transformant; la quantité de mouvement se conserve sans transformation; l'énergie de percussion produit un effet local, la quantité de mouvement un effet général. Toutes les difficultés dans l'application sont levées par ces quelques indications.

Un mot encore sur une singulière illusion. Nous jugeons des vitesses un peu par la durée du passage d'un mobile, beaucoup par les dégâts qu'il produirait s'il était arrêté brusquement; ces derniers sont proportionnels au carré de la vitesse; nous sommes donc conduits, inconsciemment, à surévaluer les grandes vitesses, d'où quelques conflits entre les chauffeurs (que je me garderai de défendre) et les agents de la force publique, qui voient trop facilement du cent à l'heure.

59. — A l'intérieur du projectile.

Au moment du départ, il se passe, à l'intérieur du projectile, toutes sortes de choses intéressantes, grâce aux énormes accélérations dont il est le siège. Les artilleurs utilisent ces accélérations pour armer la fusée, c'est-à-dire pour mettre en état d'agir le mécanisme destiné à produire l'explosion de la charge intérieure. Or, si ce mécanisme était toujours déclenché, la manipulation des projectiles serait extrêmememt dangereuse, et produirait certainement plus de morts d'hommes dans l'armée qui les emploie que dans les rangs ennemis.

On constitue, par exemple, le percuteur par deux cylindres creux superposés (fig. 50), dont l'un peut se chausser sur l'autre. En temps ordinaire, il en est empêché par un petit ressort à ailettes qui le maintient à l'avant, tandis qu'un ressort-boudin cale l'ensemble des deux cylindres de telle sorte qu'ils ne puissent faire aucun mouvement.

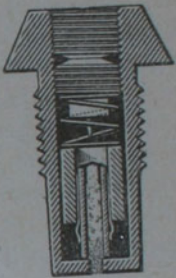


Fig. 50. — Au départ d'un projectile, la fusée s'amorce; à l'arrivée, le percuteur provoque l'explosion de la charge.

Au moment du départ du projectile, le cylindre extérieur écrase le ressort à ailettes et s'engage fortement sur l'autre cylindre, qui est dès lors entièrement libre de se mouvoir dans son logement. Lorsque le projectile touche le but, il éprouve une brusque accélération rétrograde. Le percuteur continue son mouvement, frappe une amorce, et le feu se communique à la charge intérieure.

Les mêmes effets d'inertie ont été utilisés par MM. Sebert et Hugoniot pour inscrire les accélérations du projectile à l'intérieur de l'âme. Dans ce but, le projectile est muni, dans son axe, d'une forte barre d'acier, sur laquelle glisse un curseur attenant à un diapason. Celui-ci, dont les branches sont tenues écartées par un noyau qu'elles pincent, est accroché à l'avant du projectile par une petite goupille, suffisante pour supporter le poids qui lui est fixé, mais qui se brise pour un effort un peu supérieur. Or nous venons de voir que, au moment du départ d'un projectile, l'accélération engendre des forces qui sont des milliers de fois supérieures au poids des objets. La goupille peut donc se briser sans entraîner sensiblement la masse, qui reste pratiquement en repos. L'obus avance, tandis que le diapason, en vibrant (puisque maintenant ses branches sont libres), trace au moyen d'un style une ligne ondulée le long de la barre sur laquelle il glisse.

La barre allant de plus en plus vite, les ondulations s'allongent; elles marquent des durées égales mais des chemins inégaux, dont on construit la courbe. Possédant celle-ci, on a tout ce qu'il faut pour analyser les premières phases du mouvement de l'obus. Un mécanisme particulier et très ingénieux libère alors un second diapason qui, ayant déjà une assez grande vitesse, inscrit un plus long parcours. Et, lorsqu'il bute à son tour contre le culot du projectile, toute la portion intéressante de la trajectoire intérieure est relevée.

L'obus devient ainsi un véritable laboratoire, dans lequel est inscrite toute une page de son histoire, page brève puisqu'elle dure des millièmes, ou au plus des centièmes de seconde, mais la plus intéressante de celles de sa vie, celle où, comme souvent dans la nôtre, tout un long espoir atteint sa réalisation.

60. — Le voyage de la Terre à la Lune.

C'est une autre sorte de projectile-laboratoire, un laboratoire balistico-psychologique, qu'a inventé Jules Verne, dans une des délicieuses fantaisies qui ont charmé bien des générations de jeunes lecteurs, avant que Wells eût imaginé des voyages plus fantastiques encore.

Rappelons d'abord la donnée : après la guerre de sécession, l'esprit inventif des Américains, longtemps tourné vers l'art de la guerre, et se trouvant subitement privé d'aliment, continua pendant quelque temps, avec la vitesse acquise, à imaginer des machines à détruire nos semblables. C'est à cette époque que Barbicane, directeur de l'artillerie pendant la guerre, fit un jour au Gun-Club de Baltimore cette sensationnelle proposition : construire un canon de puissance encore inconnue, destiné à lancer un projectile avec une vitesse suffisante pour atteindre la lune, et assez gros pour que les plus puissants instruments astronomiques permettent de l'apercevoir à son arrivée sur notre satellite.

Le projet était déjà très avancé lorsqu'un Parisien, Michel Ardan (lisez Nadar, alors célèbre par sa hardiesse), vint offrir de partir dans le projectile. Deux membres du Gun-Club, dont Barbicane naturellement, tinrent à accompagner Ardan, et à partager avec lui les dangers et les émotions de ce voyage sans précédent.

Le canon, constitué par un tube de fonte, coulé verticalement dans la terre, de 2 m. 70 de diamètre intérieur et de 270 mètres de profondeur, devait lancer un projectile de 8 000 kilogrammes environ, avec une vitesse suffisante pour lui permettre d'échapper à l'attraction de la terre, vitesse qui, conformément au théorème des surfaces de niveau (§ 49), est égale à celle avec laquelle un projectile partant de l'infini sans vitesse initiale tomberait sur la terre, c'est-à-dire un peu plus de 10 kilomètres par seconde. L'auteur sachant, d'une part, qu'il faut tenir compte de la résistance de l'air et que, d'autre part, il suffit d'atteindre le point où l'attraction de la lune surpasse si peu que ce soit celle de la terre, fixe la vitesse à 12 000 yards ou 11 000 mètres environ par seconde.

La question de la charge explosive fut étudiée avec un soin tout particulier. On adoptera le fulmi-coton, dont on arrêta la quantité à 180 000 kilogrammes, occupant, dans le canon, une hauteur de 60 mètres, ce qui laissait à l'obus un parcours de 210 mètres pour prendre sa vitesse.

Il fallait aussi protéger les passagers contre les dangers du choc au départ, et l'on pensa qu'aucun ressort ne serait susceptible d'amortir suffisamment la secousse. On installa donc, à 90 centimètres du culot de l'obus, un faux plancher fermant une chambre remplie d'eau, destinée à s'écouler pendant la mise en vitesse, et à rendre aussi graduelle que possible celle des trois voyageurs. Ainsi tout était parfaitement combiné pour que l'expérience réussît à souhait.

Bien entendu, nous ne ferons pas un instant à l'auteur de tant d'ouvrages qui ont donné à bien des hommes d'aujourd'hui un enthousiasme de bon aloi, l'offense d'admettre qu'il crût son expérience possible; il en avait fait certainement l'analyse et avait déguisé les impossibilités avec sa coutumière habileté qui créait l'illusion.

Ne parlons point de la résistance du canon, pour le calcul de laquelle les notions puisées dans cette *Initiation* seraient insuffisantes, et commençons par la question de la poudre.

La vitesse d'un projectile augmente naturellement avec la charge; et, lorsque celle-ci est faible, cette vitesse est grossièrement proportionnelle au quotient de chargement, c'est-à-dire au quotient de la masse de la charge de poudre par celle du projectile. Dans les canons longs, ce quotient est de l'ordre d'un quart, et l'on n'a pas trouvé grand avantage à dépasser beaucoup cette limite. D'ailleurs, à partir d'une certaine valeur de ce quotient, on ne gagne plus que très peu; d'une part, en effet, lorsque la masse des gaz devient comparable à celle de la poudre, c'est à les chasser qu'est employée une importante fraction de leur énergie; et, d'autre part, la limite infranchissable est toujours la vitesse avec laquelle les gaz s'écouleraient s'ils n'avaient rien à pousser. Dans le canon de Barbicane, la Columbiad, le quotient devait être égal à 23, et les neuf dixièmes au moins auraient travaillé en pure perte.

Passons au trajet de l'obus dans l'âme du canon : sur un parcours de 210 mètres, l'accélération moyenne aurait dû être suffisante pour communiquer à l'obus une vitesse de 11 000 m/sec. En admettant, comme précédemment (§ 57), une accélération constante, on trouve :

$$a = \frac{11\,000^2}{420} = 288\,000\ \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}.$$

$$t = \frac{11\,000}{288\,000} = 0{,}04\ \text{sec.}$$

Ainsi la durée du trajet dans l'âme aurait été de 4 centièmes de seconde, et la valeur moyenne de l'accélération, de 288 000 m/sec². Chaque objet à l'intérieur du projectile aurait donc pesé au minimum 29 000 fois son poids, et un chapeau de 100 grammes aurait écrasé son propriétaire sous le poids de près de trois tonnes. Certainement, les voyageurs se seraient senti la tête lourde.

Il est vrai que le matelas d'eau offrait une ressource. Mais un tampon, quel qu'il soit, agit uniquement en diminuant l'accélération ; dans le choc des corps solides, celle-ci est énorme, parce que les changements de vitesse se produisent sur un parcours extrêmement petit ; augmenter ce parcours de quelques millièmes de millimètre, c'est souvent le doubler ou le tripler, et diminuer dans la même proportion les efforts ; mais, lorsque l'accélération doit se soutenir sur 210 mètres, on ne la modifie pas beaucoup en l'étendant encore de 90 centimètres ; pour protéger efficacement les passagers, il aurait fallu donner à la chambre d'amortissement une longueur de quelques milliers de kilomètres.

Au sortir du canon, l'obus est soumis à l'action de la résistance de l'air. Les données manquent pour les vitesses calculées par Barbicane ; à de semblables vitesses, l'air se comporterait à peu près comme un solide, et opposerait au mouvement du projectile de terribles réactions. L'accélération rétrograde de l'obus de la Columbiad serait devenue énorme, et les restes informes des pauvres voyageurs sélénites, projetés dans le creux de l'ogive, eussent achevé de se mettre en bouillie. Puis la compression de l'air, en élevant sa température, et par là même celle de l'obus, aurait fait du projectile un astre passager comme une de ces étoiles filantes qui traversent les hautes régions de notre atmosphère, charment un instant nos regards, et laissent après elles une traînée lumineuse de poussière cosmique, qui s'éteint bientôt, emportant nos vœux et nos regrets.

CONCLUSION

Au terme de notre étude, nous avons vu se dresser devant nous une barrière que ni le savoir, ni les forces de l'homme ne peuvent l'aider à franchir ; en opposant, à un rêve qui fut peut-être celui de notre enfance, le *non possumus* des réalités matérielles, notre dernier problème nous a montré que la pensée, parfois souveraine, est souvent aussi arrêtée dans sa marche vagabonde par la saine connaissance des conditions de notre séjour terrestre.

Si, en effet, notre esprit peut errer jusqu'à la plus lointaine étoile dont un rayon de lumière nous raconte l'histoire, en revanche, nous sommes liés à la planète qui nous porte, centre et raison d'être du monde tout entier pour les philosophes des temps anciens, pour nous sphère errante et minuscule, impérieusement conduite à travers l'espace par l'un des nombreux soleils peuplant l'univers, auquel elle est, à son tour, invariablement attachée.

La science a limité les ambitions humaines ; elle a humilié notre orgueil ; elle a déposé l'homme loin du piédestal qu'il s'était lui-même dressé : et cependant elle ne l'a pas découragé ; car, pour une vaine satisfaction qu'elle lui a pour jamais ravie, combien a-t-elle apporté à son esprit de soudaines clartés, à son cœur de sublimes consolations.

Dans la marche ascendante de la pensée vers la divination des forces naturelles, les phénomènes qu'étudie la mécanique se sont, nous l'avons vu, offerts les premiers à sa clairvoyante activité; et c'est en s'approchant de la nature en toute simplicité que de grands génies, rendant à l'humanité un peu de l'orgueil dont elle s'est volontairement dépouillée, ont préparé, par un prodigieux effort, la splendide éclosion d'inventions et de découvertes à laquelle chaque jour nous donne d'assister.

Ce que la mécanique a fait pour les grands enfants qu'étaient les hommes d'autrefois, elle peut le faire encore pour les petits enfants d'aujourd'hui, qui sont les hommes de demain. C'est pourquoi, si nous avons le souci du développement de sa pensée, nous devons guider dans l'étude de cette science la jeune génération qui nous suit, afin de la mieux préparer à saisir avec fermeté l'outil qui bientôt s'échappera de nos mains.

NOTES ET PROBLÈMES

On s'est demandé pendant longtemps si l'on devait admettre, en mécanique, l'un ou l'autre des deux axiomes suivants : L'effet d'une force sur un point matériel est instantané; ou bien : une force exige un temps très court pour faire sentir ses effets.

Si l'on considère la mécanique comme une science artificielle, à laquelle on ne demande que d'être logique, on pourra joindre indifféremment l'un ou l'autre de ces axiomes à l'ensemble de ceux sur lesquelles elle est édifiée; on établira ainsi deux mécaniques distinctes.

Mais la mécanique, envisagée comme une science naturelle, ne connaît pas d'axiomes; elle se borne à tirer les conséquences des faits expérimentaux, simplifiés et ramenés à leur plus grande probabilité.

Or nous savons qu'en un dix-millième de seconde, un choc est souvent terminé, et a produit tous ses effets locaux; au bout d'un cent-millième de seconde, à partir du moment où les surfaces se sont rencontrées, les forces sont déjà sérieusement engagées. Suivant que l'on considérera comme une durée finie ou infiniment courte un cent-millième de seconde ou toute autre durée plus faible, au bout de laquelle l'effort devient juste perceptible, on se ralliera au second ou au premier des axiomes.

Remarquons toutefois que ce qui précède n'a un sens que si nous pouvons définir le premier contact de deux corps indépendamment du phénomène du choc. Si ce dernier sert à l'établir, le premier contact et la constatation de l'existence d'une force seront deux phénomènes simultanés par définition.

Quant à la transmission d'un effort à l'intérieur d'un corps, nous savons qu'elle est relativement lente, de l'ordre de quelques hectomètres ou de quelques kilomètres par seconde.

Il est nécessaire de connaître ces faits et bien d'autres, que nous révèle l'expérience, pour juger sainement des principes de la mécanique vraie, et pour les appliquer au monde matériel. Mais alors, ils acquièrent une infinie fécondité, car tous les phénomènes visibles empruntent quelque chose à la science des forces

***

Une force appliquée à un point n'existe pas dans la nature; il n'existe que des forces réparties sur des surfaces, c'est-à-dire des pressions. Une force appliquée à un espace infiniment petit engendrerait une pression infinie, à laquelle rien ne résisterait. C'est la matière elle-même qui, en cédant, élargit la surface de contact, et ramène la pression à une valeur finie.

***

Nous avons vainement cherché un repère du repos et du mouvement. Les physiciens semblaient avoir été plus heureux, en rapportant tous les mouvements à l'éther universel, considéré comme lié au système fixe de coordonnées du monde. Aujourd'hui, un recul se dessine; peu à peu, on est revenu au principe de la relativité des mouvements, qui lève de grosses difficultés dans l'interprétation d'expériences délicates. Mais ce principe nouveau, énoncé par Einstein dans la forme généralement admise aujourd'hui, cache d'angoissants mystères, dont l'éclaircissement fascine un grand nombre de géomètres et de physiciens; pour en saisir le sens, il faut être doué d'une puissance d'abstraction qui surpasse de beaucoup celle des chercheurs de la quatrième dimension de l'espace.

***

Au moment de l'atterrissage, les aviateurs font généralement face au vent, afin de réduire leur vitesse par rapport au sol, et de rendre moins rude leur premier contact avec lui. Cette pratique est dictée par une prudence correctement raisonnée, et cependant elle a été la cause de plus d'une catastrophe. En voici la raison. Par le plus grand vent, l'air constitue, au voisinage du sol, une couche dans un état de calme relatif; l'aéroplane pénétrant dans cette couche ne possède plus alors, par rapport au fluide ambiant, la vitesse nécessaire à son planement, et cherche à regagner celle-ci par une chute accélérée, sous une inclinaison supérieure à la normale. Si la couche d'air tranquille est épaisse, l'appareil retrouve à temps une vitesse permettant la manœuvre efficace du gouvernail de profondeur; sinon, il se brise au contact du sol. Une mise en marche du moteur pendant un temps très court peut, en redonnant à l'aéroplane la vitesse qui lui manque, éviter un accident; mais cette manœuvre est très délicate.

Les aviateurs ont désigné la couche immobile sous le nom très expressif de « trou d'air »; ils y tombent en effet, comme un véhicule descendrait dans un trou de la route.

***

Fixons, à un long fil souple, de petites balles de plomb, dont les distances successives soient entre elles comme les nombres impairs. Le fil étant tenu à la main dans un espace libre d'une hauteur suffisante — une cage d'escalier par exemple, — amenons la première balle au contact d'une surface sonore horizontale, planche ou peau de tambour, puis abandonnons le fil en chute libre. Les chocs seront perçus à des intervalles égaux, et, si les deux premiers plombs ont été fixés à 20 centimètres l'un de l'autre, les chocs seront distants de 1/5 de seconde.

On réaliserait difficilement une expérience plus simple et moins coûteuse montrant la relation entre les temps de chute et les espaces parcourus, d'où peuvent être déduites les autres lois de la chute.

***

Dans les cascades de montagne, les gros paquets d'eau tombant en chute approximativement libre, semblent généralement, à un spectateur éloigné, doués d'une accélération très inférieure à celle que nous avons l'habitude d'observer. Cette illusion tient au fait que nous sous-évaluons toujours les distances lorsque l'air est très pur. En mesurant avec précision la vitesse de chute d'un corps de fortes dimensions ou de grande densité, nous en déduirions immédiatement sa distance. On pourrait fonder sur ce principe un télémètre peu compliqué.

***

M. Einstein me faisait part un jour de cet aphorisme : Supposons deux physiciens très perspicaces, mais très ignorants, enfermés dans de grandes pièces closes contenant tout l'outillage au moyen duquel les lois de la mécanique puissent être découvertes. L'une de ces pièces est à poste fixe sur la terre; l'autre, éloignée de tout centre d'attraction, s'élève avec une accélération g. Quelles mécaniques construiront nos deux ermites? La même, ajouta M. Einstein, après m'avoir laissé chercher un instant une exception.

Cette réponse complète les faits mentionnés au § 33. M. Langevin, à qui j'en faisais part, ajouta : « Oui, mais ils ne construiraient pas la même physique ». Il faisait allusion aux rides produites dans l'éther par l'accélération des corpuscules électriques.

***

Nous avons fait, au § 17, une exploration grossière du champ de la pesanteur, dont la constance approximative nous a permis de généraliser les lois de la chute; il était d'ailleurs entendu que, dans nos premières investigations, nous ne cherchions ni le détail, ni la précision. Au § 27, nous avons donné une esquisse déjà plus poussée du champ d'attraction de la terre. Si nous avions voulu déduire de nos premières expériences de chute des lois rigoureuses, il aurait fallu démontrer, de plus, que l'exploration *statique* du champ d'attraction newtonien renseigne sur les effets de gravitation auxquels sont soumis les corps *en mouvement*. Si la force de gravitation se propageait comme une traction exercée sur un fil métallique (§ 55), c'est-à-dire avec une vitesse relativement faible, son action sur des corps en repos, ou sur les mobiles les plus ordinaires, différerait d'une importante fraction de sa valeur.

Tous les calculs astronomiques admettent la transmission instantanée de la force de gravitation; et il n'est guère qu'un ou deux phénomènes délicats, dont la prévision gagnerait en exactitude, si l'on faisait intervenir une vitesse finie de propagation des actions newtoniennes.

***

Nous avons vu au § 20, que Newton, puis Bessel, établirent par l'expérience la proportionnalité du poids à la masse, indépendamment de la nature des corps; les expériences récentes du baron R. Eötvös, ont conduit aux mêmes conclusions. Les recherches anciennes avaient été faites à l'aide du pendule; les nouvelles ont été exécutées au moyen de la balance de torsion.

Nos plus jeunes lecteurs peuvent se demander pourquoi l'examen d'un principe établi par Newton fut repris à deux époques ultérieures. La raison en est simple : chaque expérimentateur opère avec les moyens dont il dispose, et l'outillage se perfectionne dans le cours du temps. Pour Newton, le principe était certainement exact au millième près; Bessel crut pouvoir affirmer qu'il était encore vrai au voisinage du cent-millième, et le baron Eötvös put reconnaître la proportionnalité au delà du millionième. C'est dans des limites encore plus serrées que Landolt et M. Heydweiller purent montrer que le fait pour deux corps de se combiner ne modifie pas leur masse totale. Les chimistes acceptent cette donnée comme un axiome; les sceptiques, ou, plus exactement, les positivistes, en affirment l'exactitude au dix-millionième près. Mais le seul fait que l'on consacre périodiquement de délicates expériences à sa vérification montre que l'on n'est pas persuadé de sa rigoureuse exactitude. Landolt avait cru d'abord trouver des écarts, dont les savants n'étaient que modérément surpris.

***

Dans le *Voyage de la Terre à la Lune*, que nous avons rapidement analysé, les hôtes de l'obus, arrivés au point de pesanteur nulle, se livrent à de folles cabrioles. Etait-il bien nécessaire qu'ils attendissent d'y être parvenus, pour s'apercevoir que leur poids les avait abandonnés? En aucune façon. Aussitôt sorti de notre atmosphère, l'obus tombait en chute libre; l'accélération réelle avait remplacé en entier l'accélération virtuelle; les voyageurs étaient impondérables.

***

Lorsque nous nous tenons debout, nous ne produisons aucun travail, et pourtant nous nous fatiguons; nous consommons sans produire. Le seul fait de soutenir un effort statique nous épuise. Le travail physiologique n'est lié que dans un sens au travail mécanique; nous ne pouvons pas produire du travail sans nous consommer, mais nous pouvons nous consommer sans produire du travail. De même, un électro-aimant, pour soutenir un morceau de fer, consomme de l'énergie électrique. Les deux cas sont très analogues; nous pouvons dégrader de l'énergie sans compensation, nous ne pouvons pas la régénérer sans une dégradation équivalente. Les habits s'usent; jamais ils ne se raccommodent d'eux-mêmes.

***

La rotation d'un anneau mince révèle une relation numérique curieuse et inattendue. Supposons en effet que l'axe autour duquel il tourne soit porté par un chariot se déplaçant dans le plan même de l'anneau, avec une vitesse égale à celle des particules situées à sa périphérie. Chacune d'elles décrira une courbe nommée cycloïde, la même qu'elle dessinerait dans l'espace, si l'anneau roulait sur un plan. Un observateur monté sur le chariot pourra ignorer le mouvement de celui-ci, tandis qu'un spectateur lointain pourra ne pas connaître la rotation de l'anneau. Chacun d'eux lui attribuera seulement l'énergie correspondant au mouvement qu'il perçoit; et comme, dans les deux cas, les particules de l'anneau se meuvent avec la même vitesse linéaire, ces deux énergies auront même valeur; l'énergie d'un cerceau roulant est donc double de celle qu'il aurait s'il glissait avec la même vitesse linéaire.

La vérification est facile : un cycliste accompagne, à vitesse égale, un cerceau qu'un enfant pousse jusqu'au pied d'une montée, puis il s'abandonne à la vitesse acquise; le cerceau montera près de deux fois plus haut que le cycliste.

***

Un raisonnement « de sentiment » vient de nous faire admettre que l'énergie de rotation et l'énergie de translation s'ajoutent simplement pour constituer ensemble l'énergie totale d'un mobile animé à la fois de deux mouvements; mais il faut reconnaître que le fait, pour chacun des deux observateurs, d'ignorer l'un des deux mouvements, n'autorise pas encore à conclure qu'il puisse en négliger les effets. Si le même procédé était appliqué aux actes de la vie courante, nous pourrions tout aussi bien ignorer nos dettes. Le principe est important; nous devons donc l'établir plus solidement.

Supposons d'abord un cuirassé tirant en chasse. Sa vitesse est v_1, celle de l'obus, partant du repos, serait v_2. Le mouvement du navire s'ajoutant évidemment à celui que le canon communique au projectile, la vitesse de ce dernier sera $v_1 + v_2$. Sa masse étant m, son énergie cinétique sera

$$W = \frac{m}{2}(v_1 + v_2)^2,$$

quantité supérieure de mv_1v_2 à la somme des énergies que l'obus possédait dans le canon et que ce dernier lui a communiquée. D'où vient l'excédent? Du navire, évidemment, qui, participant au recul du canon, prend sur sa propre énergie pour en donner au projectile.

Dans le tir en retraite, au contraire, l'énergie de l'obus est déficitaire par rapport à la somme algébrique des énergies partielles. Mais, si l'on tire simultanément en chasse et en retraite des projectiles de même masse et de même vitesse initiale relative, la somme de leurs énergies est bien celle qui est donnée par l'énergie initiale augmentée de celle du tir. D'autre part, les effets sur le navire sont égaux, il conserve la même vitesse

Nous pouvons maintenant modifier le problème, et considérer un volant tournant dans le plan médian du navire. Pour les particules matérielles situées au voisinage du plan vertical passant par l'axe du volant, au moment où celui-ci est mis en marche, tout se passe comme pour les obus lancés à l'avant et à l'arrière; et, au moins pour les masses ainsi placées, le mouvement du bateau est indifférent. Mais en sera-t-il de même de celles dont le mouvement possède une composante verticale?

Pour le savoir, supposons l'axe du volant parallèle à celui du navire; s'il tourne, chacun de ses points décrira une hélice dont le pas dépendra des vitesses relatives du navire et du volant. Pour un faible parcours, le mouvement peut être considéré comme rectiligne; il est représenté par l'hypothénuse d'un triangle dont les côtés de l'angle droit sont le mouvement de translation du navire et un élément sensiblement rectiligne du mouvement circulaire. L'énergie du mouvement réel sera égale au produit de la demi-masse de l'élément considéré, par le carré de sa vitesse. Or ce carré est égal à la somme des carrés des vitesses transversale et longitudinale, dont les produits par la demi-masse de l'élément envisagé, constituent les deux fractions de l'énergie totale.

Pour le calcul de cette énergie, nous pouvons donc considérer comme indépendantes la rotation et la translation, et additionner leurs effets. Une direction quelconque de la vitesse étant décomposable en ses projections rectangulaires, le théorème que nous venons d'établir convient à tous les cas.

Son application est importante. Les grands navires modernes sont mus par des hélices qu'actionnent d'immenses turbines à vapeur, marchant à grande vitesse, et possédant une énergie de rotation très considérable. L'énergie de translation du bateau n'en est pas affectée; son démarrage est lié à une consommation d'énergie dont le facteur constant est sa masse totale, sans que l'on ait à considérer le mouvement des organes rotatifs équilibrés qu'il renferme.

***

Nous avons vu qu'un mouvement oscillatoire a pour image la projection d'un mobile décrivant une circonférence avec une vitesse constante. Au point de vue dynamique extérieur, tout se passe comme si le mobile en question était remplacé par deux autres points de masse égale chacune à celle du mobile, et décrivant deux axes rectangulaires en un mouvement oscillatoire harmonique, dans des conditions telles que, l'un étant au bout de sa course, l'autre en soit au milieu.

L'ensemble de deux mobiles tels que nous venons de les décrire pourra donc être déplacé en ligne droite sans qu'un observateur extérieur ait à connaître autre chose que leur masse; leur mouvement peut lui rester caché.

Ce fait possède aussi une portée considérable. Nous croyons savoir que les particules ultimes de toute matière sont dans une perpétuelle agitation, qui augmente avec la température, et ne se calme qu'au zéro obsolu. En raison du nombre immense des molécules que renferme chaque corps de dimensions mesurables, certains groupes d'entre elles constituent des ensembles assimilables à des volants équilibrés tournant sur leur axe; et, grâce à l'indépendance de l'énergie de rotation et de l'énergie de translation, la capacité énergétique des corps n'est pas modifiée par les changements de leur température [1].

Ce résultat est une conséquence logique de deux relations importantes en elles-mêmes : le théorème de Pythagore et la proportionnalité de l'énergie cinétique au carré de la vitesse.

***

Nous pouvons nous tenir debout sur le pied droit, le bras droit étendu en avant, la jambe gauche faisant équilibre à l'arrière, et, dans cette position, donner un vigoureux soufflet à un être imaginaire. Involontairement, nous lui donnerons aussi un coup de pied, et nous ne manquerons pas d'admirer la solidarité inconsciente de nos membres supérieurs et inférieurs. Si nous nous munissons d'une haltère, l'expérience en deviendra plus frappante. Il ne sera pas nécessaire au surplus de la répéter souvent pour nous convaincre du sens purement mécanique de la solidarité constatée.

Les aéronautes connaissent bien un semblable phénomène. Ils savent qu'en dehors des rotations spontanées, les ballons libres tournent sur eux-mêmes lorsque les hôtes de la nacelle se déplacent dans cette dernière, à une certaine distance de son axe; par rapport à leur déplacement, le ballon recule.

Nous avons vu que la résistance à la rotation est gouvernée par le moment d'inertie; remplaçons donc le ballon et l'aéronaute par deux mobiles possédant respectivement les mêmes moments d'inertie par rapport à l'axe commun; et, pour donner au problème la forme la plus simple, supposons ces mobiles constitués par des masses égales, dont les distances à l'axe seront proportionnelles à la racine carrée des moments d'inertie considérés. Pour conserver l'équilibre statique autour de l'axe commun, nous pourrons supposer chacune des masses divisée en deux parties égales, à même distance de l'axe; mais cela est un détail. Les masses devront, naturellement, être supportées par des poutres, que nous devrons supposer dénuées de masse. Entre ces poutres, on aura logé un ressort, s'appuyant sur l'une d'elles pour repousser l'autre. L'effort s'exerçant sur chaque masse sera inversement proportionnel à sa distance à l'axe; il en sera de même de son accélération, de sa vitesse et du chemin parcouru au bout d'un certain temps. Le produit de celui-ci par sa distance à l'axe sera donc le même pour les deux mobiles; en

1. Nous tenons à rester ici dans le domaine de la Mécanique. Pour les physiciens, qui considèrent depuis quelques années d'immenses vitesses possédées par les particules matérielles, l'énergie varie plus rapidement que le carré de la vitesse, et devient infinie pour la vitesse de la lumière. A moins qu'on ne soumette le théorème de Pythagore à un amendement compensateur, les faits que nous avons démontrés ont une réalité limitée. Toutefois, pour les vitesses que l'on considère en mécanique, personne ne pourra jamais se douter que ces principes ne sont pas rigoureusement exacts.

d'autres termes, les *aires* balayées par les deux poutres seront égales.

Si l'ensemble des deux poutres avait eu, avant le début de l'expérience, une rotation commune, celle qu'engendre le ressort se serait simplement ajoutée à elle, augmentant la vitesse angulaire de l'une des poutres, et diminuant l'autre ou même la renversant, suivant la vitesse angulaire primitive et le travail du ressort. Les poutres auraient déjà balayé une aire donnée en un temps donné, dès avant l'action du ressort; et, après celle-ci, la somme des aires serait restée la même. C'est ce résultat qui constitue le théorème connu sous le nom de *Loi des aires.*

***

La loi des aires jouit, il y a quelques années, d'une subite popularité. Le grand physiologiste Marey, qui unissait à un sens profond de la recherche une malice du meilleur aloi, demanda un jour à ses confrères de l'Académie des sciences comment un chat, abandonné les pattes en l'air à une petite distance du sol, pouvait se retourner sur lui-même, de façon à retomber sans dommage. On fut bien près de déclarer le résultat impossible, puisque les rotations doivent toujours s'équilibrer, donnant au minet la seule possibilité de se mettre en tire-bouchon. Cependant, durant toute la semaine qui sépara les deux séances, les matous s'obstinèrent à retomber sur leurs pattes. Le commandant Guyou en donna l'explication : un corps isolé ne possède pas un axe fixe; tout axe passant par son centre de gravité peut devenir, pour un instant, celui par rapport auquel la loi des aires se vérifie; et, dans un corps déformable, le centre de gravité lui-même se déplace notablement. Par un reploiement en équerre, le chat donne, à son train de devant, un appui sur son train de derrière, éloigné de l'axe instantané, et possédant un grand moment d'inertie; il peut ainsi retourner son avant-train; puis, choisissant un nouvel axe de rotation, il retourne également l'arrière-train; et, lorsqu'au bout de deux ou trois dixièmes de secondes, il arrive au contact du sol, la rotation entière est accomplie. Les chats, sans aucun doute, connaissent depuis des millénaires la dynamique des rotations.

***

Cette dynamique, dont nous venons d'explorer les abords, devient plus claire à l'esprit, lorsqu'on la rapproche de celle des translations.

Dans les rotations, l'angle est l'espace auquel sont rapportés les mouvements; le moment dynamique les produit, le moment d'inertie s'oppose à son action. Comme dans les translations, le temps mesure la durée. Combinant entre elles les grandeurs fondamentales, angle, moment d'inertie, temps, comme nous avons rassemblé la longueur, la masse et le temps, nous créons la vitesse angulaire, quotient de l'angle par le temps, l'accélération angulaire, quotient du moment dynamique par le moment d'inertie, puis le travail par le déplacement du moment dynamique dans un certain angle, ou son équivalent cinétique, produit du moment d'inertie par le demi-carré de la vitesse angulaire. Le produit du moment d'inertie par la vitesse angulaire, ou celui du moment dynamique par le temps, est l'analogue exact de la quantité de mouvement; c'est pourquoi j'ai proposé de donner à cette grandeur le nom de *quantité de rotation*, au lieu du terme plus compliqué : *moment d'une quantité de mouvement*, sous lequel on la désigne ordinairement.

Le tableau ci-après fait bien ressortir le parallélisme des deux groupes de grandeurs qui sont dérivées, dans chacun d'eux, par les mêmes opérations, des trois grandeurs fondamentales.

Translations	Rotations
Longueur.	Angle.
Masse.	Moment d'inertie,
Temps.	Temps.
Vitesse.	Vitesse angulaire.
Accélération.	Accélération angulaire.
Force.	Moment dynamique.
Travail.	Travail.
Energie cinétique.	Energie cinétique.
Quantité de mouvement.	Quantité de rotation.

Les deux derniers groupes de notions possèdent une propriété commune : elles se rapportent à des grandeurs conservatrices. Nous avons reconnu que, dans toutes les transformations purement mécaniques, le travail et l'énergie s'échangeant, leur somme reste constante. Le principe de la conservation des quantités de rotation n'est autre que la loi des aires.

***

Trois points définissent un plan; de même, un ensemble de trois points peut toujours s'appliquer sur une surface, suffisamment étendue. Un quatrième point se place où il peut. C'est pourquoi les instruments délicats sont portés par trois pointes de vis, définissant un triangle de sustentation à l'intérieur duquel tombe la projection du centre de gravité de l'objet supporté.

Cependant, les quatre pieds d'une table ou d'une chaise arrivent à reposer sur le plancher. C'est que la table ou la chaise fléchissent ou se déforment, afin de rechercher la quatrième surface d'appui. C'est pour des raisons analogues que l'on réussit à appliquer pratiquement deux plans matériels l'un sur l'autre.

***

Supposons un wagon citerne abandonné sur une voie inclinée, le long de laquelle il descend librement. Quelle forme affectera la surface du liquide qu'il contient? En réfléchissant à ce problème, on comprendra la difficulté que rencontrent les inventeurs d'instruments destinés à indiquer la pente des routes pour l'usage des automobilistes, ou celle du chemin aérien pour les aviateurs.

***

Chacun de nous a vu secouer un prunier. Cette opération, très efficace, fait intervenir plusieurs principes de mécanique. Débrouiller leurs effets les ferait mieux comprendre. L'un d'eux est très analogue à celui qui entre en jeu lorsqu'on fait claquer un fouet. L'énergie se propageant le long d'un fil de masse linéaire décroissante produit des accélérations croissantes. La mèche d'un fouet prend une vitesse énorme, dont le brusque changement provoque la rupture des filaments extrêmes.

***

Au beau temps de la traction hippomobile, Marey proposa un attelage élastique transmettant, par l'intermédiaire de ressorts, l'effort du cheval au véhicule entraîné. Cet attelage permet une meilleure utilisation de la puissance du cheval, et lui épargne de la fatigue. Il est intéressant d'en rechercher les motifs.

Dans un ordre d'idées analogue, on peut discuter avec fruit le mode d'action des ressorts des voitures, et scruter les raisons pour lesquelles ils ne suppléent pas complètement les coûteux bandages pneumatiques.

Ces derniers, au surplus, font surgir des problèmes intéressants et délicats; pourquoi, par exemple, le caoutchouc bien que très tendre, est-il si inusable? Pourquoi, en revanche, un silex coupe-t-il les bandages?

***

Lorsqu'on exerce une forte traction sur un barreau de métal, il éprouve des déformations permanentes qui, bientôt, se localisent dans une région où se produit une contraction de la section (striction), qui est le prélude d'une rupture. Si l'on tourne alors le barreau pour le ramener à un diamètre uniforme, on constate que la deuxième striction ne se produit pas à l'endroit de la première. Poursuivant l'expérience, on trouve que chaque striction a durci le métal, qui est devenu plus résistant.

Ce phénomène est particulièrement intense dans certains aciers au nickel, dans lesquels la striction voyage d'elle-même jusqu'à ce que tout le barreau se soit durci. Très doux au début, il est devenu dans son entier, après un allongement considérable, un métal sec et dur. Lorsqu'enfin il se casse, c'est après avoir soutenu une lutte héroïque. Ce phénomène fait songer à une sorte de solidarité et de vie interne de la matière.

***

On s'étonne parfois que le saut d'une puce soit presque aussi haut que le nôtre. Il est aisé de montrer que le désagréable parasite n'y a pas grand mérite. Voici le raisonnement simpliste : Cent millions de puces sautent à la même hauteur qu'une puce unique; dans leur ensemble, elles possèdent une masse de l'ordre de celle d'un homme et des muscles qui peuvent être équivalents. Cependant il existe, dans la vitesse de détente, une différence qu'il est intéressant d'analyser.

***

Ce dernier problème nous conduit à penser aux similitudes et aux différences entre les grands et les petits animaux. Le problème du volant (§ 36) nous a montré que l'on ne peut pas conclure immédiatement du petit au grand. En nous souvenant que les masses augmentent comme le cube des dimensions, les sections comme leur carré, on comprendra que les mêmes formes ne puissent être conservées. Pour une solidité relative égale, un grand animal aura un aspect plus lourd qu'un petit, c'est-à-dire que ses colonnes sustentatrices seront relativement plus fortes.

Pour retrouver les avantages des petits animaux, les grands devraient habiter une terre plus petite, où l'attraction serait moindre. Ils pourraient avoir des pattes plus grêles, ou grandir encore en conservant leur forme.

***

Nous comprenons donc que l'habitat exerce, sur les êtres animés, une action prépondérante[1]. A ce propos, nous pouvons nous demander comment devraient être constitués des êtres adaptés à la vie sur Jupiter.

D'abord, ces êtres seraient petits, puisque la pesanteur est forte; cependant ils marcheraient vite, puisque le mouvement des jambes est essentiellement une oscillation pendulaire, dont la pesanteur règle la période. Or l'atmosphère de Jupiter est très dense, et, pour s'y déplacer facilement avec rapidité, les habitants devraient être pisciformes. Mais alors ils seraient mal soutenus par deux pattes seulement, et devraient en avoir au moins quatre. Le lévrier semble ainsi représenter assez bien le type de ce que la mécanique nous enseigne devoir être le jovien, lorsque la vie sera possible sur la Planète maîtresse.

1. On lira avec beaucoup de profit, le très suggestif ouvrage d'Edmond Perrier : *La vie dans les planètes*, où ce thème est développé jusqu'à ses plus lointaines conséquences.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

PRÉPARATION A L'ÉTUDE DE LA MÉCANIQUE

CHAPITRE I

Comment on étudie la nature.

CHAPITRE II

Le mouvement.

DEUXIÈME PARTIE

EXPOSÉ DES PRINCIPES

CHAPITRE III

La force, cause de l'accélération.

CHAPITRE IV

Le travail des forces.

CHAPITRE V

Les forces sans le mouvement.

CHAPITRE VI

Le repos et le mouvement des forces.

CHAPITRE VII

Les mouvements oscillatoires.

TROISIÈME PARTIE

DÉVELOPPEMENTS ET APPLICATIONS

CHAPITRE VIII

Les calculs de la mécanique.

CHAPITRE IX

Le choc.

CHAPITRE X

Un peu de résistance des matériaux.

CHAPITRE XI

Un peu d'artillerie.

1239-20. — Coulommiers. Imp. Paul BRODARD. — P2-21.

COULOMMIERS
Imprimerie Paul BRODARD